



IV CONFERENCIA INTERNACIONAL DE DESARROLLO ENERGÉTICO SOSTENIBLE CIDES 2025

Tecnologías para reducir la contaminación atmosférica mediante purificación de gases de combustión en un central azucarero

Technologies to reduce atmospheric contamination through purification of combustion gases in a sugar mill

MSc. Yaima Izquierdo González¹, MSc. José Alberto Pérez Hernández², MSc. Yohana de la Hoz Izquierdo³.

- 1- Yaima Izquierdo González¹. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA), Cuba. E-mail: yaima.izquierdo2@gmail.com
- 2- José Alberto Pérez Hernández². Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA), Cuba. E-mail: jose.alberto@icidca.azcuba.cu
- 3- Yohana de la Hoz Izquierdo³. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA), Cuba. E-mail: yohana.delahoz@icidca.azcuba.cu

Resumen

La industria azucarera constituye la principal fuente de generación de energía renovable en el país, constituyendo esto, uno de los principales focos de emisiones de contaminantes gaseosos a la atmosfera, producidos por la combustión de la biomasa cañera (bagazo) en las calderas, y enviados a la atmosfera. Para reducir estas emisiones de contaminantes a niveles permisibles se propone un sistema de purificación de estos gases de combustión. Como estrategia que sigue el país de avanzar en las líneas de producción más limpia en los últimos años, se ha tomado como política la implementación de nuevas legislaciones, inversiones e incrementar las medidas, exigencias y requisitos de las normativas nacionales de emisiones de contaminantes (NC-TS 803: 2010). En este trabajo se proponer el uso de nuevas tecnologías para la reducción de gases residuales y partículas sólidas, garantizando una disminución de contaminantes atmosféricos de 7500 mg/m³ a



1.123 mg/m³, siendo este menor que la normativa nacional de emisiones de contaminantes que es de 150 mg/m³.

Abstract

The Sugar Industry constitutes the main source of renewable energy generation in the country, constituting one of the main sources of emissions of gaseous pollutants into the atmosphere, produced by the combustion of sugarcane biomass (bagasse) in the boilers, and sent to the atmosphere. To reduce these pollutant emissions to permissible levels, a purification system for these combustion gases is proposed. As a strategy that the country follows to advance in cleaner production lines in recent years, it has taken as a policy the implementation of new legislation, investments and increasing the measures, demands and requirements of the national regulations for pollutant emissions (NC-TS 803: 2010). In this work, the use of new technologies for the reduction of residual gases and solid particles is proposed, guaranteeing a decrease in atmospheric pollutants from 7500 mg/m³ to 1.123 mg/m³, this being lower than the national regulations for pollutant emissions, which is of 150 mg/m³.

Palabras claves: Limpiezas de gases; Emisiones contaminantes; Equipamientos y tecnologías; Medio ambiente.

Keywords: Gas cleaning; Polluting emissions; Equipment and technologies; Environment.

1. Introducción

La protección del medio ambiente se ha basado tradicionalmente en la adopción de medidas correctoras cuando el daño ya está producido. En la actualidad, se está generalizando el concepto de prevención, a través de medidas que se anticipen en lo posible a la aparición del problema.

La contaminación atmosférica está compuesta por muchos componentes químicos como el dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COV), óxidos de nitrógeno (NOX) y partículas sólidas y líquidas conocidas como material particulado. Muchos de estos contaminantes liberados a la atmósfera provienen



de las Industrias Azucareras, principalmente de las calderas que queman combustibles fósiles y son responsables de un alto porcentaje de la contaminación ambiental (F. Pire., 2002).

Los principales focos de contaminantes atmosféricos en los Ingenios Azucareros de Cuba son las emisiones gaseosas y las partículas sólidas que están presentes en los gases de combustión, estos son los producidos por la incineración de la biomasa cañera (bagazo), que son expulsados a la atmosfera mediante la chimenea (Gil, Z., 20025).

En el sector hay distintos tipos de calderas, de diferentes tecnologías y de diferentes capacidades de producción de vapor y pueden oscilar 60 y 80 toneladas de vapor/h, aunque con más frecuencia se utilizan 60 t/h y que operan a presiones entre 20 y 30bar y temperatura de sobrecalentamiento del vapor de 400°C. La emisión de contaminantes a la atmósfera depende de múltiples factores, como son calidad de la combustión, calidad del combustible, depende del tipo de caldera y de otros factores humanos que están vinculados a la operación de la caldera.

El estado Cubano como estrategia para minimizar la contaminación atmosféricas producidos por los gases de combustión, ha tomado como política la implementación de nuevas legislaciones, inversiones e incrementar las medidas, exigencias y requisitos de las normativas nacionales de emisiones de contaminantes (NC-TS 803: 2010), con el objetivo de garantizar el sostenido desarrollo de la economía, protegiendo el entorno y el medio ambiente, basado en medidas correctoras y el empleo de nuevas tecnologías (Norma NC-TS 803: 2010).

El presente trabajo tiene como objetivo fundamental proponer un equipamiento tecnológico para la limpieza del proceso de combustión de un central azucarero, así reducir la contaminación al medio ambiente, preservar la calidad de vida de las personas y evitar que los niveles de contaminación atmosférica lleguen a límites perjudiciales para los seres humanos.

2. Metodología

En la actualidad, ninguna de las industrias productoras de azúcar y derivados tienen concebidas Tecnologías de producciones limpias amistosas con el medio ambiente, hoy en día es política del país realizar inversiones para lograr incrementos productivos, pero



tienen como prioridad la reducción de la carga contaminante tanto líquida como de emisiones gaseosas (Cordovés, M., 2013).

Los principales focos industriales de emisión de contaminantes a la atmósfera son las chimeneas de las instalaciones de combustión para la generación de energía eléctrica y calor industrial, y de los procesos industriales. Procesos del que depende como fuente energética primordial la Generación de Vapor por la quema de este biocombustible en sus calderas. Donde las principales fuentes de emisión de contaminantes gaseosos en la atmósfera, se forman después de la quema de los residuos de biomasa de residuos de la caña de azúcar (bagazo) en las calderas (Santamaría, A., 2014).

Para minimizar los impactos ambientales se realizó un estudio y caracterización de las emisiones de partículas, así como el desarrollo de nuevas tecnologías de limpieza de gases que den respuestas a los requisitos cada vez más rigurosos de reducción de emisión de contaminantes.

- **Nuevas Legislaciones y Normas sobre Emisiones en Cuba**

Las emisiones de contaminantes gaseosos a la atmosfera son los producidos por la combustión de la biomasa cañera, bagazo generado en la caldera de los centrales azucareros. Como estrategia que sigue el país de avanzar en las líneas de producción más limpia en los últimos años, se ha tomado como política la implementación de nuevas legislaciones, inversiones e incrementar las medidas, exigencias y requisitos de las normativas nacionales de emisiones de contaminantes. (NC-TS 803: 2010). En la tabla 1 se muestra las Nuevas legislaciones y normas sobre emisiones en Cuba.

Tabla 1. (NC-TS 803: 2010) Emisiones Máximas Admisibles.

Fuentes	Lista de Contaminantes	Los Indicadores Existentes		Comentario
		Normas Existente (mg/ Nm ³)	Nueva norma NC-TS 803: 2010 (mg/ Nm ³)	
Calderas de vapor para la quema de la biomasa	SO ₂	1000	500	el contenido de O ₂ no más de 6% en términos gas seco
	NO _x	100	100	
	Partículas solidas	400	150	
	PM 10	300	100	

Tecnologías de Depuración de Gases de Combustión (Prado, R., 2016).

Existen 4 grandes grupos de sistemas de limpiezas de partículas sólidas:

1. Separadores húmedos.
2. Precipitadores electrostáticos (de placas; tubulares; de dos etapas).



3. Separadores mecánicos: (ciclones).
4. Filtros de gases (filtros de mangas).

1. Separadores húmedos (Prado, R., 20166).

Los lavadores y absorbedores húmedos son equipos en los que se transfiere la materia suspendida en un gas portador a un líquido absolvedor en la fase mezcla gas - líquido, debido a la colisión entre las partículas de polvo y las gotas de líquido en suspensión en el gas.

Ventajas

- Permite manejar gases inflamables con poco riesgo.
- Reducción en la temperatura de gases calientes.
- Permite remover gases y partículas al mismo tiempo.
- Permite variar su eficiencia de colección con facilidad.

Desventajas

- Pueden presentar problemas de corrosión.
- Tanto el líquido de lavado como los sedimentos producidos pueden generar contaminación al desecharse.
- Un alto incremento en la humedad del gas hace visible la descarga en la chimenea.
- No se puede recuperar las partículas tal como son generadas en la fuente.

2. Precipitadores electrostáticos (Prado, R., 2016).

Ventajas

- Alta eficiencia de colección incluso para partículas muy pequeñas.
- Puede manejar grandes volúmenes de gas.
- Permite la recuperación del material colectado ya sea solido o líquido.
- Puede manejar gases a altas temperaturas.

Desventajas

- Alto costo de instalación.
- El espacio requerido es grande.
- Las variaciones en las condiciones de operación pueden afectar su desempeño.
- Poco adecuado cuando la resistividad de las partículas es demasiado alta o demasiado baja.



3. Separadores mecánicos: (Ciclones) (Prado, R., 2016).

Los ciclones son uno de los equipos más empleados dentro de las operaciones de separación de partículas sólidas de una corriente gaseosa, además de poder emplearse para separar sólidos de líquidos. Su éxito se debe en parte a que son equipos de una gran sencillez estructural debido a que no poseen partes móviles y a que apenas exigen mantenimiento.

Ventajas

- Bajos costos de capital.
- Falta de partes móviles, por lo tanto, pocos requerimientos de mantenimiento y bajos costos de operación.
- Caída de presión relativamente baja, comparada con la cantidad de partículas removidas.
- Las limitaciones de temperatura y presión dependen únicamente de los materiales de construcción.
- Colección y disposición en seco.
- Requisitos espaciales relativamente pequeños.

Desventajas

- Eficiencias de recolección de partículas suspendidas totales relativamente bajas, particularmente para partículas menores de 10 μm .
- No pueden manejar materiales pegajosos o aglomerantes.
- Las unidades de alta eficiencia pueden tener altas caídas de presión, incrementando el consumo energético en ciclones.

4. Filtros de mangas (Prado, R., 2016).

Los filtros de mangas son considerados como los equipos más representativos de la separación sólido-gas mediante un medio poroso, ya que son capaces de recoger altas cargas de partículas del proceso industrial. Su función consiste en recoger las partículas sólidas que arrastra una corriente gaseosa, esto se consigue haciendo pasar dicha corriente a través de un tejido. El tamaño de las partículas a separar por los filtros de mangas será entre 2 y 30 μm .

Ventajas

- Presentan altos rendimientos de depuración, incluso para partículas muy finas. Son valores usuales rendimientos del 99 % al 99,9 %.



- Pueden operar con una amplia variedad de polvos, de distinta naturaleza y propiedades tanto físicas como químicas.
- Permiten un diseño y construcción modular, siendo así adaptables al tratamiento de caudales de gas muy distintos.
- Eficiencia de colección es muy alta.
- Permite manejar fluidos de gas pequeños o muy grandes.
- Se pueden utilizar para filtrar diversos tipos de polvos.
- Consumo de energía moderado.

Desventajas

- Gran necesidad de espacio para su implantación.
- No pueden operar en ambientes húmedos o cerca del punto de rocío de la corriente gaseosa a tratar, pues existe el riesgo de colmatación de la tela al quedarse el polvo húmedo adherido a ellas tras la limpieza.
- No pueden depurar polvos adhesivos o aglomerantes por razones similares a la anterior.

3. Resultados y discusión

Se realizó un estudio de los 4 equipos de limpieza de partículas sólidas, de los cuales, según las características del bagazo y su bajo costo de capital se determinó implementar **los Equipos de Ciclón** para la extracción del sólido gaseoso y **Filtro de Mangas** para los finos. Con la implementación de estos equipos podremos incrementar la eficiencia de separación de las emisiones de contaminantes producidos en la combustión, y reducir el impacto ambiental.

- **Separadores Mecánicos (Ciclón)**

Cálculos del Ciclón

Para el cálculo y diseño de un ciclón de alta eficiencia hay que tener en cuenta el diámetro del ciclón, caída de presión, relación de velocidades, la eficiencia y la velocidad de entrada, los cuales se debe regir por los parámetros del ciclón. Tabla 2 se muestra los parámetros del ciclón representado por la norma (Londoño, E., 2006) y (А.С.Тимохин., 2003. cc 462-492).



Tabla 2. Parámetros de diseño del ciclón

Parámetros del ciclón	Norma	Parámetros calculados para el nuevo diseño de ciclón
Diámetro del ciclón D_c (m)	≤ 1	0.80
Caída de presión (Pa)	≤ 2488.16	1304.4
Relación de velocidades	≤ 1.35	1.09
Velocidad de entrada (m/s)	15.2 - 27.4	22
Eficiencia (%)	-	92

Como se observa en la tabla 2, el ciclón cumple con todos los parámetros de la norma, por tanto, el ciclón esta alto para su operación.

- **Filtro de mangas**

Cálculos del filtro de mangas

Para el cálculo y diseño de un filtra de mangas hay que tener en cuenta el número de mangas, caída de presión, velocidad del gas y la eficiencia, los cuales se debe regir por los parámetros del filtro de mangas. Tabla 3 se muestra los parámetros del filtro de mangas representado por la norma (Garcías, M., 2013), (А.С.Тимохин., 2013. сс 499-542) y (А.С.Тимохин., 2013. сс 515-541).

Tabla 3. Parámetros de diseño del filtro de mangas.

Parámetros filtro de mangas	Norma	Resultados obtenidos
Eficiencias %	≥ 99	99.6
Caída de presión (Pa)	≤ 2488.16	2328.3
Velocidad del gas (m/s)	15.2 - 27.4	22

Como se observa en la tabla 3, el filtro de mangas cumple con todos los parámetros de la norma, por tanto, el filtro de mangas esta alto para su operación.

Los sistemas de limpiezas y purificación de partículas y gases se realizan en serie. Por esa razón se aplica en la primera etapa un sistema de limpiezas con ciclón con una eficiencia de 92% y bajo costo de mantenimiento. Posteriormente se aplica un filtro de mangas para alcanzar los niveles de emisiones requerido por la norma (NC-TS 803: 2010), con una eficiencia de 99.6%. Si se pone una sola etapa para limpiar y purificar las partículas y gases, no cumple con los niveles de emisiones requeridas por la norma (NC-TS 803: 2010).

Por ejemplo, si se pone el ciclón, el solamente va a alcanzar una limpieza de partículas de 92%, saliendo para la atmosfera un 8%, esto no cumple con la norma (NC-TS 803:

2010). Si pones el filtro de mangas solo, este enseguida se tupe y se deteriora muy rápido y cambiarlo es muy costoso. Por esta razón se trabaja con dos sistemas de limpiezas de partículas en serie para alcanzar un 0.5% de contaminaste de partículas y gases que salga para la atmosfera. En la figura 1 se muestra cómo quedaría instalados los equipos de tratamientos de gases y partículas de polvos en un central azucarero.

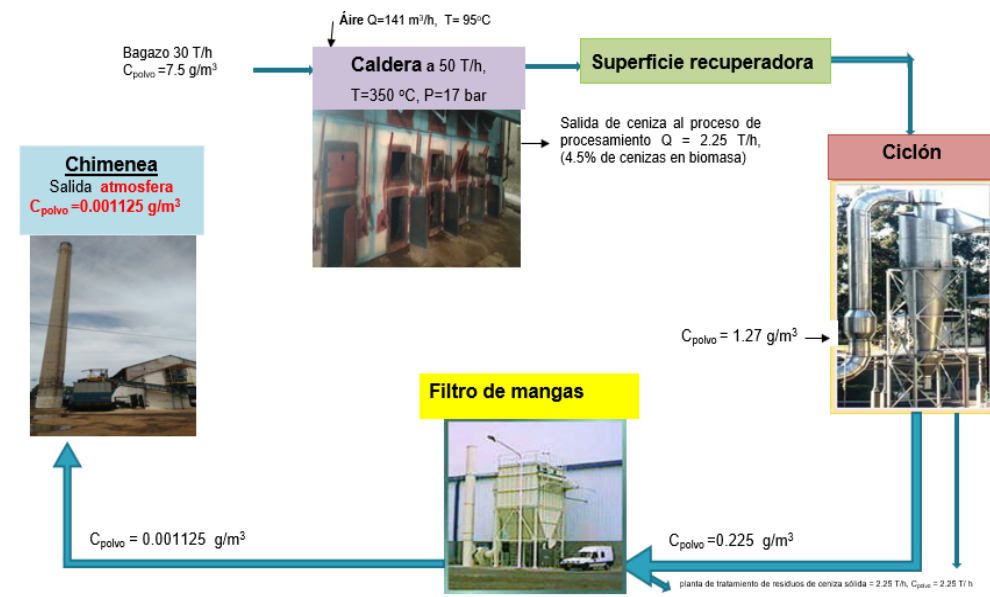


Figura. 1. Esquema del sistema de limpiezas de gases. fuente: elaboración propia.

La descarga de los gases de escape de la caldera va a la succión del separador ciclónico y filtro de mangas. El rechazo del separador ciclónico y del filtro de mangas se une en el colector de cenizas de la caldera, que este consiste en un foso que está por debajo del nivel cero de la caldera, donde hay una piscina de agua donde se descarga las cenizas de la caldera. Este sistema de extracción en humedad permite la reducción de la contaminación ambiental. El gas producido en el reactor se acondiciona para proteger a los demás equipos de la erosión y la corrosión. También se acondiciona para obtener la temperatura adecuada del gas de síntesis para la etapa siguiente. El esquema propuesto de limpieza de gases debe dar cumplimiento a las exigencias y las normativas nacionales. La siguiente tabla 4 muestra los volúmenes de emisiones máximas admisibles en una caldera típica.



Tabla 4. Comparación anual de los volúmenes de las emisiones de gases de un central típico con caldera de 60 t/h y la implementación de las propuestas de proyecto de este trabajo, con o sin equipos de purificación.

Parámetros de contaminación atmosféricas	Valores anuales existentes de emisiones de ceniza para la caldera de 60 t/h en un central típico SIN EQUIPO DE PURIFICACIÓN	Propuesta del proyecto de emisiones anuales de ceniza para la caldera 60 t/h en un central típico CON EQUIPOS DE PURIFICACIÓN	Estándar (mg/m ³)
Cantidad de bagazo para la combustión (t/h)	22.75	22.75	100
Volumen de gases de combustión (m ³ /h)	195	195	100
% de emisión de partículas (mg/m ³)	6500	6500	150
Cantidad total (g/m ³)	7.5	7.5	150
Partículas gaseosas que entran al ciclón (g/m ³)	-	0.225	-
Partículas de gases que entran al filtro de mangas (g/m ³)	-	0.001125	-
Partículas de gases que salen de la chimenea a la atmosfera (mg/m ³)	7.5 g/m³ 7500 mg/m³	0.001125 g/m³ 1.125 mg/m³	150 mg/m³

Comité de Normalización Industrial. Estándares Cubanos 13: NC-TS 803: 2010

En la tabla 4 se observa que hubo una disminución excepcional de partículas de gases que salen a la atmosfera con la implementación de los dos equipos de purificación (Ciclón y Filtro de mangas), cumpliendo esto con la norma (NC-TS 803: 2010).

En el gráfico 2. Se muestra el estimado de la comparación del total de la densidad de masa de la contaminación de los gases de combustión en el período de trabajo, de noviembre a mayo, en la actual versión (sin depuración de gases) con las actuales y las nuevas normas de cuba, así como con los resultados esperados con la implementación de las propuestas principal de este trabajo.

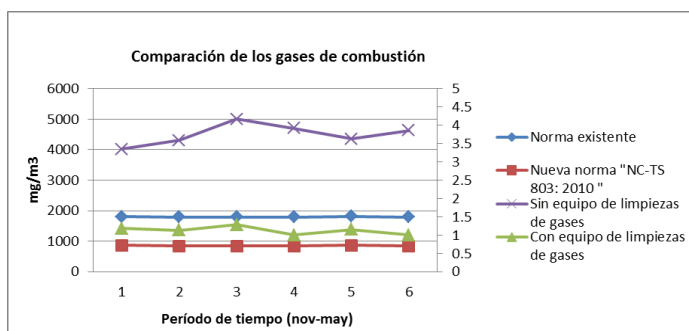


Gráfico. 2 Comparación de emisiones. fuente: elaboración propia.



Esto significa que las nuevas instalaciones del filtro + mangas ciclón cumplen con los requisitos de los estándares cubanos para reducir la contaminación ambiental y, por lo tanto, proporcionar una vida mejor.

- **Evaluación económica**

Todo proceso inversionista requiere de un estudio de factibilidad técnico-económico que justifique la inversión. Este resulta una evaluación muy particular pues la inversión no está asociada a un incremento de la producción ni de la calidad del producto azúcar que se produce, pero si en la reducción de los costos de producción pues todos los meses se paga una penalización por las emisiones al medio ambiente que sobrepasan los límites establecidos por las normas (Moura, M. 2013).

Gastos anuales por no cumplimiento de las emisiones de contaminantes

La entidad productiva, central pagan anualmente un monto anual en el entorno de los 200 000 USD anual. Se considera para la evaluación económica el último pago de la factura anual perteneciente al 2017 que fue de 210 000 USD. En la tabla 5 se muestra el resumen de la evaluación económica de la inversión (Moura, M. 2013).

Tabla 5. Resumen la evaluación económica de la inversión.

Elemento	Valor
Ahorros reportados anuales por no pago de penalización por no emitir emisiones contaminantes	210 000 USD
Periodo de amortización de la inversión	10 años
Valor total de equipos, montaje, proyectos y puesta en marcha	879 500 USD
Gastos anuales durante la vida útil de la instalación	Operación=50 000 USD Mantenimiento=250 000USD Total = 300 000 USD
Depreciación 6 %	35 385 USD
Gastos generales en toda la vida útil del equipo	1 214 885 USD

Para determinar el tiempo de amortización el gasto general que es 1 214 885 USD se divide por el valor ahorro producido por no emitir contaminaste a la atmosfera, es decir: $1\,214\,885 / 210\,000 = 6$ años. Esto significa que se reduce el pago de la inversión en un



60%, donde en 6 años alcanza el pago de los gastos de inversión de un central típico con nuevos equipos de purificación de gases y partículas.

4. Conclusiones

1. El uso de nuevos equipos reduce las emisiones de partículas a la atmósfera de 1.125 mg/m^3 , es menor que la norma estándar de 150 mg/m^3 .
2. La planta de tratamiento de residuales de emisiones de partículas se va amortizar con los impuestos dejados de pagar por las emisiones de contaminantes.
3. Se propone crear un centro de monitoreo para controlar las emisiones de las calderas y establecer las medidas correctivas pertinentes.

5. Referencias bibliográficas

1. Comité de Normalización Industrial. Estándares Cubanos 13: NC-TS 803: 2010.
2. Cordovés, M., Sáenz, T., Cabello, A. Los derivados de la caña de azúcar // ICIDCA, vol. 47, no.3, (2013), pp. 31–37.
3. F. Pire Riva, S. Contaminación atmosférica. Centro de Ingeniería de Procesos, CUJAE, 2002.
4. García, M., Silva, C. Eficiencia de un filtro de manga no tratamiento de gases oriundos de calderas de quema de biomasa sólida, vol. 9, no. 11, (2013), pp. 293-308.
5. Gil, Z. Estudio del Impacto Ambiental del uso del bagazo como fuente de energía en centrales azucareros en cuba. estudio de caso "Melanio Hernández", [Tesis Doctoral], Universidad de Girona, 2005, pp.230.
6. Londoño, E. Diseño óptimo de ciclones// Revista Ingenierías Universidad de Medellín, vol. 5, Nº. 9, (2006), pp.123-139.
7. Moura, M. Caracterización e viabilidad económica de eso energético de colheita de procesamiento de pinus, 2013.
8. Prado, R., Icaza, J." Rediseño del sistema de depuración de gases de combustión del incinerador del centro de desarrollo tecnológico sustentable (CDTS)" [Ingeniería mecánico], Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil-Ecuador, 2016, pp. 70.



9. Santamaría., A. La industria azucarera y la economía cubana a principios del siglo XX, vol. 42, no 2, (2014), pp. 71-114.
10. А.С.Тимонин., Инженерно-эолологический справочник. Том 1, 2003. сс 462-492.
11. А.С.Тимонин., Инженерно-эолологический справочник. Том 1, 2003. сс 499-542.
12. А.С.Тимонин., Инженерно-эолологический справочник. Том 1, 2003. сс 515-541.