



Hoja de Datos - Tecnología de Control de Contaminación del Aire

Nombre de la Tecnología:

Filtro De Papel/Material No Tejido - Filtro de Aire de Alta Eficiencia para Partícula (en inglés *High Efficiency Particle Air (HEPA) Filter*)
Filtro de Aire de Ultra Baja Penetración (Referido como Medio Extendido) (en inglés Ultra Low Penetration Air (ULPA) Filter)

Tipo de Tecnología: Dispositivo de Control - Captura/Disposición

Contaminantes Aplicables: Materia Particulada sub-micrométrica (MP), de diámetro aerodinámico mayor o igual a 0.3 micras (μm) y, MP de diámetro aerodinámico mayor o igual a 0.12 micras y que es químicamente, biológicamente o radioactivamente tóxica; contaminantes peligrosos del aire (CPA) que están en forma particulada, tales como la mayoría de los metales (el mercurio es la excepción notable, ya que una porción importante de las emisiones son en forma de vapor elemental).

Límites de Emisión Alcanzables/Reducción:

Los filtros *HEPA* y *ULPA* se clasifican por su eficiencia mínima de recolección. Actualmente existen muchas normas y clases internacionales de filtros de alta eficiencia. (Osborn, 1989). En general, los filtros *HEPA* y *ULPA* se definen como aquellos que tienen la siguiente designación de eficiencia mínima: (Heumann, 1997):

HEPA: 99.97% de eficiencia para la remoción de MP de diámetro de 0.3 μm o mayor,

ULPA: 99.9995% de eficiencia para la remoción de MP de diámetro de 0.12 μm o mayor.

Algunos filtros de medio extendido son capaces de eficiencias más altas. Los filtros disponibles comercialmente pueden controlar MP de 0.01 μm diámetro con eficiencias de 99.99+% y MP de 0.1 μm de diámetro con eficiencias de 99.9999+% (Gaddish, 1989; Osborn, 1989). Varios factores determinan la eficiencia de recolección de los filtros *HEPA* y *ULPA*. Estos se incluyen la filtración del gas, la velocidad, las características de las partículas, y las características del medio filtrante. En general, la eficiencia de recolección se incrementa al aumentarse la velocidad de filtración y el tamaño de partículas. Además, la eficiencia de recolección se aumenta a medida que se incrementan la densidad y el espesor de la plasta de polvo en el filtro. (EPA, 1998a).

Las pruebas de eficiencia de recolección de los filtros *HEPA* y *ULPA* se realizan a condiciones de filtro limpio. Esto contrasta con los filtros que se limpian continuamente, como las casas de bolsas, los cuales se prueban una vez que han alcanzado una caída de presión en estado estable. Los filtros del tipo de los que se limpian, tienen una concentración casi constante de partículas en el efluente, mientras que los filtros *HEPA* y *ULPA* tienen eficiencias globales que varían con la carga del particulado. (Heumann, 1997)

La eficiencia de cada filtro es probada por el fabricante antes de ser embarcado. Para aplicaciones nucleares, el Department of Energy - DOE (Departamento de Energía en EE.UU.), y el dueño u operador, requieren pruebas adicionales después de la instalación (Burchsted et al, 1979). Hay dos pruebas diferentes para la eficiencia de recolección de los filtros *HEPA* y *ULPA*. La eficiencia de los *HEPA* se evalúa por medio de una prueba a temperatura con dioctyl phtalate - DOP (ftalato de dioctilo - FDO). El polvo para la prueba

de eficiencia de los filtros HEPA, son partículas de FDO de un solo tamaño, 0.3 μm de diámetro, generado por vaporización y condensación. Otros aerosoles pueden utilizarse según lo especifiquen o se requieran para otras aplicaciones. Un fotómetro mide la penetración de la partícula en el filtro HEPA, detectando la dispersión de la luz. La eficiencia de los ULPA se prueba utilizando un contador de partículas corriente arriba y corriente abajo del filtro. Con un atomizador se inyecta una solución de FDO, alcohol y aceite mineral en hexano, para generar partículas con diámetro de 0.1 a 0.2 μm (Heumann, 1997).

Tipo de Fuente Aplicable: Punto.

Aplicaciones Industriales Típicas:

Los filtros HEPA y ULPA son mejor aplicados en situaciones en las que se requieren altas eficiencias de recolección de MP sub-micrométrica, donde no se puede limpiar del filtro la MP tóxica y/o peligrosa o donde la MP es difícil de limpiar del filtro. Los filtros HEPA y ULPA son típicamente utilizados en aplicaciones que involucren PM químicas, biológicas y radioactivas. Los filtros HEPA y ULPA se instalan como el componente final en un sistema de recolección de MP, corriente abajo de otros dispositivos de recolección de MP, tales como los precipitadores electrostáticos o las casas de bolsas. (Heumann, 1997)

Las aplicaciones industriales comunes de los filtros HEPA y ULPA son en incineradores de residuos de hospitales, residuos nucleares de bajo nivel y mezclas de residuos, y en sistemas de ventilación y de seguridad nuclear. Adicionalmente, los filtros son utilizados en un número de aplicaciones comerciales y procesos de manufactura, tales como cuartos limpios, laboratorios, industria de alimentos y la manufactura de productos farmacéuticos y micro-electrónicos (Osborn, 1989). Los filtros pueden ser utilizados en cualquier aplicación donde se genere polvo que pueda ser recolectado y conducido a una localización central.

Características de la Emisión:

- a. **Flujo de Aire:** Los filtros HEPA y ULPA están actualmente limitados a aplicaciones con baja capacidad de flujo de aire. Los paquetes estándar de filtros son unidades prefabricadas, en existencia. Pueden manejar desde menos de 0.10 hasta 1.0 metros cúbicos estándar por segundo (m^3/sec) (“cientos” hasta 2,000 pies cúbicos estándar por minuto (*scfm*)) (AAF, 2000; Vokes, 1999). Los sistemas de filtro HEPA diseñados para aplicaciones nucleares, requieren capacidades más altas. Para estas aplicaciones, bancos o módulos de filtros son conectados en paralelo para incrementar la capacidad de flujo de aire (EPA, 1991). Los sistemas modulares disponibles comercialmente pueden manejar velocidades de flujos de aire en el rango de 5 to 12 m^3/sec (5,000 a 40,000 *scfm*) (AAF, 2000; Vokes, 1999).

La capacidad de flujo de aire es una función de la resistencia o caída de presión a través del filtro y de la carga de partículas. A medida que se forma la plasta de polvo en el filtro, aumenta la resistencia y por lo tanto, disminuye el flujo de aire. Puesto que el filtro no se limpia, la velocidad de flujo de aire continúa disminuyendo a medida que opera el sistema. Después que la caída de presión a través del filtro alcanza un punto tal que previene un flujo adecuado de aire, el filtro debe ser reemplazado y enviado a disposición. Por estas razones, los filtros HEPA y ULPA son utilizados en aplicaciones que tienen bajas velocidades de flujo de aire o bajas concentraciones de MP (Heumann 1997).

- b. **Temperatura:** Las temperaturas están limitadas por el tipo de medio filtrante y por el sellador utilizados en los paquetes de filtros. Los cartuchos estándar pueden manejar temperaturas del gas hasta de aproximadamente 93°C (200°F) . Con medio filtrante y material sellador apropiados, los filtros HEPA comerciales pueden aceptar temperaturas hasta de 200°C (400°F). Los filtros HEPA con sellos mecánicos vidriados o de cerámica, pueden aceptar temperaturas hasta de 537°C (1000°F). (EPA, 1991)

Para bajar la temperatura de la corriente del contaminante, puede emplearse enfriamiento por aspersión o dilución con aire. Esto evita que se excedan los límites de temperatura del filtro (EPA, 1998b). Al bajar la temperatura, sin embargo, aumenta la humedad de la corriente del contaminante. Los filtros HEPA y ULPA pueden tolerar algo de humedad. Sin embargo, humedades mayores a 95% pueden causar que el medio filtrante se tape, resultando en falla (EPA, 1991). Por lo tanto, la temperatura mínima de la corriente del contaminante debe permanecer por encima del punto de rocío de cualquier condensable en la corriente. Las casas de bolsas y los conductos asociados deben ser aislados y posiblemente calentados si pudiera presentarse condensación (EPA, 1998b).

- c. Carga de Contaminantes:** Las cargas típicas del contaminante van desde 1 a 30 gramos por metro cúbico (g/m^3) (0.5 a 13 granos por pie cúbico (gr/ft^3)) (Novick, et al, 1992). La capacidad de retención de polvo, compara la ganancia en peso del filtro con el aumento en la caída de presión durante un período específico de tiempo (volumen del flujo de aire). Las capacidades típicas de retención de polvo de entrada varían desde 500 a 1000 $\text{g}/1000 \text{ scfm}$ (Gadish, 1989). Tal como se discute arriba, la caída de presión a través del filtro es una función de la carga de contaminantes. Los filtros HEPA y ULPA son mejor utilizados en aplicaciones que tienen bajas concentraciones de MP o en las que se prohíbe la limpieza del filtro (Heumann, 1997).
- d. Otras Consideraciones:** El contenido de humedad y de corrosivos, son las principales características del gas que requieren de consideraciones de diseño. Tal como se discutió anteriormente, con un medio filtrante, recubrimiento y construcción del filtro apropiados, se acepta humedad hasta cerca de 95%. Se dispone de filtros que pueden manejar corrientes de gases corrosivos con concentraciones hasta cerca de varios porcientos. Estos filtros están contruidos de materiales especiales y por lo general son más caros (EPA, 1991)

Los filtros HEPA y ULPA son monitoreados por caída de presión a través del medio filtrante. Una vez que la caída de presión se vuelve inaceptable, el filtro debe ser reemplazado. La caída típica de presión para un filtro limpio es de 25 milímetros (mm) de columna de agua (1 pulgada (*in.*) de columna de agua). Un incremento de la caída de presión en el rango de 51 a 102 mm de columna de agua (2 a 4 *in.* de columna de agua), indica el fin de la vida de servicio de un filtro (EPA, 1991, Burchsted et al, 1979). Nuevos filtros están disponibles los cuales tienen caídas de presión cuando están limpios, en el rango de 6 a 13 mm de columna de agua (0.25 a 0.5 pulgada de columna de agua) (Burchsted et al, 1979).

Los filtros HEPA y los ULPA son típicamente operados bajo presiones de aproximadamente 203 mm de columna de agua (8 pulgada de columna de agua). Las altas presiones de operación pueden romper el filtro. Los filtros HEPA utilizados en la industria nuclear tienen requisitos sísmicos, además de las características de funcionamiento discutidas anteriormente (EPA, 1991)

Requisitos de Pre-tratamiento de las Emisiones:

Los filtros HEPA y ULPA requieren de pre-filtración para remover MP grande o para concentraciones de polvo mayores a 0.03 gramos por centímetro cuadrado (g/cm^2) (0.06 libras por pie cuadrado (lbs/ft^2)). La pre-filtración puede realizarse en varias etapas. Para reducir MP de gran diámetro, pudieran requerirse recolectores mecánicos, tales como los ciclones o las torres lavadoras venturi. Para filtrar MP de diámetro mayor a 2.5 μm , se requiere de casas de bolsas o filtros de cartucho estándares. (EPA, 1991)

En aplicaciones a alta temperatura, el costo del diseño de filtros resistentes a alta temperatura debe ponderarse contra el costo de bajar la temperatura de entrada con enfriamiento por aspersión con dilución con aire (EPA, 1998b).

Información de Costos:

A continuación se presenta el costo de capital para un sistema de filtros *HEPA*. Para la estimación de los costos se supone un diseño modular pre-fabricado y en existencia a condiciones típicas de operación. El sistema de filtración es para una aplicación nuclear e incluye una sección de prueba y un par de sensores de presión. No se incluye el equipo auxiliar, tal como ventiladores y conductos.

La estimación se basa en una cotización del fabricante para el costo del equipo comprado únicamente, en dólares de 1999 (AAF, 2000). El proveedor no proporcionó los costos de operación y mantenimiento (O y M), costos anualizado ni eficiencia de costo, porque estos son específicos de la aplicación. Los costos de capital para los filtros *HEPA* y *ULPA* son significativamente menores que para una casa de bolsas; sin embargo, los costos de O y M tienden a ser mucho más altos. Los requisitos tales como la frecuencia de cambio de filtros, procedimientos de monitoreo y de prueba, procedimientos de mantenimiento, y perfiles de los residuos impactan los costos de O y M.

Los costos están dictados primordialmente por la velocidad de flujo volumétrico de la corriente del contaminante y por la carga del contaminantes. En general, una unidad pequeña controlando una carga baja de contaminantes, no será tan efectiva en costo como una unidad grande controlando una carga alta de contaminantes. (EPA, 1998b). Actualmente, los filtros *HEPA* y *ULPA* están limitados a aplicaciones con bajas velocidades de flujo. El rango que se muestra de costos de capital, es para velocidades de flujo de $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (3,000, *scfm*) y $19 \text{ m}^3/\text{s}$ (40,000 *scfm*), respectivamente.

Los contaminantes que requieren un nivel de control inusualmente alto o que requieren que el medio filtrante, los adhesivos o la unidad de filtración sean construidos con materiales especiales tales como el acero inoxidable, incrementarán el costo del sistema. Los costos adicionales para controlar corrientes más complejas de contaminantes, no están reflejados en las estimaciones dadas más abajo.(EPA, 1991).

- | | | |
|----|------------------------------|--|
| a. | Costo de Capital: | \$6,400 a \$8,500 por m^3/s (\$3 a \$4 per <i>scfm</i>) |
| b. | Costos de O y M: | Específicos de la aplicación |
| c. | Costo Anualizado: | Específicos de la aplicación |
| d. | Eficiencia de Costos: | Específicos de la aplicación |

Teoría de la Operación:

Los filtros *HEPA* y *ULPA* contienen generalmente un medio de papel. Los nuevos diseños de filtros pueden contener medios no tejidos, los cuales utilizan tecnologías recién desarrolladas de fibras finas (INDA, 2000). Generalmente, el medio filtrante se fabrica de fibras de vidrio enmarcadas, tal como la micro fibra de boro silicato (EPA, 1991). El diámetro pequeño de la fibra y la alta densidad de empaquetado tanto del papel como del medio no tejido, permiten la eficiente recolección de MP sub-micrométrica (Gaddish, 1989). La corriente del gas residual se pasa a través del medio fibroso de filtración, ocasionando que la MP de la corriente del gas sea recolectada en el medio por tamizado y por otros mecanismos. La plasta de polvo que se forma en el medio filtrante con la MP recolectada, puede aumentar la eficiencia de recolección (EPA, 1998a).

El medio filtrante es plisado para proporcionar una mayor relación de área superficial a velocidad de flujo volumétrico. Por esta razón, en ocasiones se conoce a los filtros *HEPA* y *ULPA* como medios filtrantes extendidos. Sin embargo, un plizado muy cerrado puede causar que la MP cubra el fondo de los pliegues, reduciendo el área superficial (*EPA*, 1998a). Para evitar un colapso de el medio filtrante, con frecuencia se emplean separadores corrugados de aluminio (*Heumann*, 1997). La profundidad de los pliegues puede variar desde 2.5 centímetros (cm) (1 *in.*) hasta 40 centímetros (cm) (16 *in.*). Generalmente, el espaciado del plizado es entre 12 y 16 pliegues por pulgada, aunque ciertas condiciones requieren menos pliegues, de 4 a 8 pliegues por pulgada (*EPA*, 1998a).

Los diseños más comunes son las celdas de filtración de caja y celdas de filtración cilíndricas. En la celda de caja, el medio plisado se coloca en un marco cuadrado rígido, construido de metal o de madera. El aire fluye del frente a la parte posterior del filtro. Las cajas miden 60 cm (24 *in.*) de lado aproximadamente y de 6 a 30 cm (3 a 12 *in.*) de ancho (*EPA*, 1991). El medio en una celda de filtración cilíndrica está soportado por marcos de alambre por dentro y por fuera. Una tapa metálica sella el medio en uno de sus extremos. El aire fluye del exterior al interior del filtro. Esto permite una velocidad de flujo mayor que con las celdas de caja, puesto que más área superficial está expuesta (*Vokes*, 1999). Los paquetes cilíndricos típicos son de 50 centímetros (cm) (20 *in.*) de diámetro y de 35 a 60 cm (14 to 24 *in.*) de altura (*Vokes*, 1999).

En ambas celdas, de caja y cilíndricas, el medio se sella al marco o tapa utilizando poliuretano, resina epóxica u otro adhesivo disponible comercialmente. Una malla metálica protege de daños a la cara del medio. La celda de filtración se monta en un marco de soporte, utilizándose un empaque o un sellador fluido. Por lo general, el filtro se monta en el lado del plenum del aire limpio (*EPA*, 1991). El filtro puede montarse directamente en el conducto o en una caja separada. Para MP de grandes diámetros, los sistemas de filtros *HEPA* y *ULPA* requieren de pre-filtración. Generalmente, los sistemas de filtros *HEPA* y *ULPA* son el componente final de un sistema de captura de MP (*Heumann*, 1997).

Las celdas de filtros *HEPA* y *ULPA* generalmente son utilizados como filtros tipo desechables. Tal como se discutió anteriormente, cuando la plasta acumulada resulta en velocidades inaceptables del flujo de aire, se reemplazan los filtros. En la mayoría de los diseños, el reemplazo de la celda del filtro se realiza por el lado del aire limpio y por fuera de la caja de filtración. Esto reduce el riesgo de exposición de los trabajadores de mantenimiento a la MP. Esta condición es particularmente importante en aplicaciones en las que se filtran CPA o MP tóxica. En muchas de las aplicaciones con CPA o MP tóxica, la *Occupational Safety and Health Administration - OSHA* (Administración de Salud y Seguridad Ocupacionales) requiere procedimientos especiales para el reemplazo de filtros, comúnmente conocidos como procedimientos *bag in/bag out* (bolsa puesta/bolsa quitada) (*Heumann*, 1997).

La operación del filtro puede requerir equipo adicional. Pueden necesitarse sensores de presión a la entrada y la salida para medir el cambio en la caída de presión a través del filtro. Esto no solo indica cuando debe reemplazarse el filtro, sino que también monitorea la integridad del sistema de filtración (*EPA*, 1991). En las aplicaciones que requieren que la prueba de eficiencia con FDO sea administrada en el sitio, pudieran necesitarse orificios de muestreo y de inyección, y un aparato para pruebas (*EPA*, 1991). Pudiera instalarse un dispositivo especial para facilitar los procedimientos bolsa puesta/bolsa quitada (*Vokes*, 1999).

Las celdas individuales de filtros *HEPA* y *ULPA* manejan capacidades de flujo de aire de hasta cerca 1.0 m³/sec (2,000 *scfm*) (*Vokes*, 1999). En algunas aplicaciones, tales como las de la industria nuclear, se requieren mayores capacidades de flujo de aire. Para incrementar la capacidad, varios filtros son encasillados en bancos o módulos, los cuales son conectados al mismo conducto. Esto permite utilizar unidades pre-fabricadas para una variedad de aplicaciones y proporciones de flujo de aire (*Osborn*, 1998). En este tipo de diseño, pueden utilizarse compuertas para sellar alguna porción del filtro para mantenimiento (*Vokes*, 1999).

El número de celdas de filtración utilizadas en un sistema particular, está determinado por la relación aire-a-tela, o la relación del flujo volumétrico del aire al área de la tela. La selección de la relación aire-a-tela, se basa en las características de la carga de particulado y de la caída de presión a través del filtro. Las aplicaciones prácticas de los medios filtrantes fibrosos, requieren el uso de grandes áreas de filtración, para minimizar la caída de presión a través del filtro (EPA, 1998a). Los medios filtrantes de papel y de material no tejido utilizados en los filtros HEPA y ULPA, tiene mayor caída de presión a través del filtro que las telas tejidas utilizadas en las bolsas. Por esta razón, los filtros HEPA y ULPA son utilizados a menores velocidades de flujo de aire y cargas de particulado más bajas que en los diseños de casas de bolsas. Tal como se discutió anteriormente, una vez que la velocidad del flujo de aire a través del sistema de filtración disminuye a un punto inaceptable, el filtro debe ser reemplazado (Heumann, 1997).

Las condiciones de operación son factores importantes en la selección de los materiales utilizados en las celdas de filtros HEPA y ULPA. Las corrientes de contaminantes con altas temperaturas de operación, alta humedad o corrosividad, requieren medios filtrantes, selladores, materiales y recubrimientos especiales. Estos materiales especiales incrementan el costo del sistema (EPA, 1991).

Por lo general, los filtros HEPA y ULPA no se limpian. Un sistema dinámico de limpieza pueda dar como resultado que el filtro no mantenga su eficiencia de diseño. Los esfuerzos mecánicos causados por el golpeteo del aire y la vibración del sistema de limpieza, pueden causar fugas (Heumann, 1997).

Ventajas:

Los filtros HEPA y ULPA se diseñan específicamente para la recolección de MP sub-micrométrica con altas eficiencias de recolección. Estos filtros son mejor utilizados en aplicaciones con bajas proporciones de flujo y bajas concentraciones del contaminante. El aire de salida del filtro está muy limpio y, en muchos casos, puede ser re-circulado dentro de la planta (AWMA, 1992). No son sensibles a fluctuaciones menores en las condiciones de la corriente de gas (Heumann, 1997). Normalmente, no son problemas la corrosión ni la oxidación de sus componentes. A diferencia de los precipitadores electrostáticos, los sistemas de filtros HEPA y ULPA no requieren del uso de alto voltaje, por lo tanto, pueden recolectarse polvos inflamables con el cuidado apropiado (AWMA, 1992). Estos filtros están disponibles en un rango de dimensiones y condiciones de operación. Los sistemas y corazas de filtros comerciales están disponibles en varios tipos de configuraciones para cubrir una variedad de requisitos de instalación y operación. Estos sistemas vienen equipados de fábrica con muchos dispositivos, tales como los equipos de prueba y de monitoreo (AAF, 2000; Vokes, 1999).

Desventajas:

Los medios de papel y de material no tejido que se utilizan en los filtros HEPA y ULPA, tienen una resistencia significativamente más alta que las fibras tejidas que se utilizan en las casas de bolsas. Las altas eficiencias de los filtros HEPA y ULPA requieren que se mantenga la integridad de los sellos del filtro. El medio filtrante está sujeto a daño físico por los esfuerzos mecánicos (Heumann, 1997). Las temperaturas en exceso a 95°C (200°F), o las corrientes de contaminantes corrosivos requieren el uso de materiales especiales en el filtro, los cuales son más caros (EPA, 1991). La concentración de algunos polvos en la coraza del filtro puede representar un peligro de explosión, si se admite accidentalmente una chispa. El medio filtrante puede arder si se recolecta polvo fácilmente oxidable (AWMA, 1992). Los sistemas de filtros HEPA y ULPA requieren de mucho mantenimiento y de cambios frecuentes de los filtros. La vida de los filtros puede acortarse en presencia de altas temperaturas y de particulados o constituyentes ácidos o alcalinos en el gas. Las altas proporciones de flujo o las altas cargas de polvo, pueden también reducir la vida de operación del filtro. Los filtros HEPA y ULPA no pueden operarse en ambientes húmedos. Los materiales higroscópicos, la

condensación de humedad y los componentes adhesivos espesos, pueden causar taponamiento del medio filtrante (EPA, 1991).

Una desventaja específica de las unidades *HEPA* y *ULPA*, es que pueden generar un volumen alto de residuo recolectado con una baja concentración del contaminante. En las aplicaciones para CPA y en aplicaciones para MP química, biológica o radioactiva, los filtros deben disponerse como residuos peligrosos. El residuo se compone de marcos de metal o madera, aglutinantes orgánicos y empaques, medio filtrante de fibra de vidrio y contaminantes peligrosos (EPA, 1991).

Otras Consideraciones:

Los filtros *HEPA* y *ULPA* son útiles para recolectar partículas cuya resistividad ya sea demasiado bajas o demasiado altas como para ser recolectadas con precipitadores electrostáticos (AWMA, 1992). A diferencia de las casas de bolsas, en las cuales se requiere que los trabajadores entren al colector para cambiar los filtros, los sistemas de filtros *HEPA* y *ULPA* están diseñados para reemplazar los filtros fuera de la coraza del colector. Esto los hace ideales para aplicaciones que involucren CPA o MP tóxica. La MP recolectada se adhiere fuertemente al medio filtrante para su subsecuente disposición. Los procedimientos bolsa puesta/bolsa quitada que pudieran ser requeridos por OSHA, son fácilmente realizados con estos filtros (Heumann, 1997).

Referencias:

AAF, 2000. *Personal communication from Ben Franklin, Director of Nuclear Environmental Sales for AAF International, Inc. to P. Hemmer of The Pechan-Avanti Group, Division of E.H. Pechan and Associates, Inc, January 18.*

AWMA, 1992. *Air & Waste Management Association, Air Pollution Engineering Manual, Van Nostrand Reinhold, New York.*

Burchsted et al, 1979. C. A. Burchsted, A. B. Fuller, and J. E. Kahn, *Nuclear Air Cleaning Handbook, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., ERDA 76-21 (1979).*

Croom, 1998. M. L. Croom, "New Developments in Filter Dust Collection", *Chemical Engineering, Vol. 103, No. 2, pp. 80-84.*

EPA, 1991. U.S. EPA, Office of Air and Radiation Research and Development, "Radiation and Mixed Waste Incineration, Background Information Document, Volume 1: Technology," EPA 520/1-91-010-, Research Triangle Park, NC., May.

EPA, 1998a. U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, "Stationary Source Control Techniques Document for Fine Particulate Matter," EPA-452/R-97-001, Research Triangle Park, NC., October.

EPA, 1998b. U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, "OAQPS Control Cost Manual," Fifth Edition, Chapter 5, EPA 453/B-96-001, Research Triangle Park, NC. December.

Gadish, 1989. T. Gadish, *Indoor Air Pollution Control. Lewis Publishers, Inc., Chelsea, MI.*

Heumann, 1997. W. L. Heumann, *Industrial Air Pollution Control Systems, McGraw Hill Publishers, Inc., Washington, D.C.*

INDA, 2000. Personal communication from Chuck Allen of the International Nonwoven and Disposables Association to P. Hemmer of The Pechan-Avanti Group, Division of E.H. Pechan and Associates, Inc., February 11.

Novick et al, 1992. V. J. Novick, P. R. Monson, and P. E. Ellison, "The Effect of Solid Particle Mass Loading on the Pressure Drop of HEPA Filters", Journal of Aerosol Science, Vol. 23, No. 6, pp. 657-665.

Osborn, 1989. P.D. Osborn, The Engineer's Clean Air Handbook, Butterworths and Co., Boston, MA.

Vokes, 1999. BTR Environmental Ltd., VOKES, internet web page www.vokes.com/air/, Vokes Air Filtration Technology, last updated December 22.