

CAPÍTULO III PROCESOS DE EXPLOSIÓN

A menudo sucede que no se da la atención suficiente al peligro de explosión de materiales tales como aluminio, polvo de cereal, polvo de madera, etc. Muchos polvos finamente divididos en suspensión en aire son peligro de explosión potenciales y las causas de ignición en estas nubes de polvo son muchas.

3.1 DEFINICIÓN DE EXPLOSIÓN

Una explosión es la rápida expansión de gases, resultados de un rápido movimiento de presión u onda de choque. La expansión puede ser mecánica o química.

El comportamiento de una explosión depende de un gran número de parámetros, los cuales se resumen en la Tabla 3.1.

El comportamiento de la explosión es muy difícil de representar. Se han retomado muchas aproximaciones al problema, incluyendo teoría, estudios semiempíricos y

TABLA 3.1 PARÁMETROS QUE AFECTAN SIGNIFICATIVAMENTE EL
COMPORTAMIENTO DE LAS EXPLOSIONES.

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none">1. Temperatura ambiental.2. Presión ambiental.3. Composición del material explosivo.4. Propiedades físicas del material explosivo.5. Naturaleza de la fuente de ignición: tipo, energía y duración.6. Geometría de los contornos: confinada o no confinada.7. Cantidad del material combustible.8. Turbulencia del material combustible.9. Tiempo antes de la ignición.10. Velocidad a la cual se libera el combustible. |
|---|

empíricos. A pesar de este esfuerzo, el comportamiento de la explosión no está completamente entendido. La ingeniería práctica, por consiguiente, debe usar resultados extrapolados cuidadosamente y dar un margen de seguridad conveniente en todos los diseños (Bartknecht, 1981).

3.2 DETONACIÓN Y DEFLAGRACIÓN

Las explosiones son detonaciones o deflagraciones; la diferencia depende de la velocidad de impacto de la onda que emana de la explosión.

Suponga una mezcla de combustible contenida dentro de un tubo largo. Una pequeña chispa, flama, llama u otra fuente de ignición inicia la reacción en un extremo del tubo. Después de la ignición, se inicia una llama corriente abajo de la tubería.

En el frente de la flama hay una presión o impacto de onda como se muestra en la Figura 3.1. Si la presión de onda se mueve más rápido que la velocidad del sonido en un medio no reactivo la explosión es una detonación; si se mueve a una velocidad menor que la del sonido es una deflagración.

La combustión de una mezcla de combustible y aire en el motor es una deflagración, aun pensando que el proceso completo de combustión ocurre aproximadamente en $1/300$ de seg.

Una detonación ocurre mucho más rápido, aproximadamente $1/10000$ de seg.

El impacto de onda se debe a la expansión de los gases por la reacción, debido a los efectos estequiométricos (cambio en el número de moles) o efectos de expansión térmica.

La relación entre impacto-presión y reacción se determinan mientras ocurre una deflagración o detonación.

Para las deflagraciones, el incremento de la presión es de varias atmósferas. Para las detonaciones el aumento de la presión es generalmente de 10 veces o más (Lees, 1986).

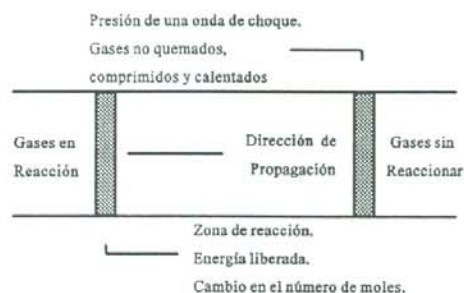


Figura 3.1 Reacción y presión de propagación frontal a través de un tubo.

Si la propagación de la reacción o de la llama dependen de una difusión molecular o turbulenta, entonces el rango de energía liberada está limitada por la transferencia de masa. El resultado es una llama relativamente baja y una evolución de presión. Esto es típico de las deflagraciones con movimientos frontales más lentos que la velocidad del sonido.

Existen algunos mecanismos que llevan a una detonación explosiva. El ingrediente esencial es que la energía debe ser liberada en un tiempo muy corto, dentro de un pequeño volumen para producir una presión inicial o impacto de onda significativo. Se han propuesto dos mecanismos para describir tales casos. En el primero, llamado mecanismo térmico, la temperatura del gas se incrementa por la reacción, conduciendo a la aceleración misma de la reacción.

En el otro mecanismo, llamado mecanismo de ramificación de cadena, los radicales libres o centros aumentan rápidamente por la reacción elemental. Esto ocurre cuando un radical libre participa en una reacción que produce dos radicales libres. Ambos mecanismos pueden considerarse en el comportamiento de una explosión.

Una deflagración puede también desarrollarse dentro de una detonación. Esto es común en tuberías, pero no sucede lo mismo en recipientes o espacios cubiertos. En un sistema de tuberías la energía de una deflagración puede alimentar la onda de presión dando como resultado un aumento en la presión adiabática. La presión asciende y resulta una detonación total (Lees, 1986).

3.3 EXPLOSIONES CONFINADAS

Una explosión confinada se da en un espacio limitado, tal como un recipiente o un edificio.

Dos de los escenarios más comunes comprenden vapores y polvos explosivos. Estudios empíricos han demostrado que la naturaleza de la explosión es una función de algunas características determinadas experimentalmente, las cuales dependen del material explosivo usado, e incluye la inflamabilidad o límites explosivos. El rango de explosión se eleva después de que asciende la mezcla inflamable y la presión es máxima después de la ignición. Estas características se determinan usando dos unidades de laboratorio, las cuales se muestran en las Figuras 3.2 y 3.5.

Aparato de explosión para vapores

El aparato que se usa para determinar la naturaleza de la explosión de vapores se muestra en la Figura 3.2. El procedimiento para esta prueba incluye, (1) evacuación del recipiente, (2) ajuste de temperatura, (3) medida de los gases para obtener la mezcla apropiada, (4) ignición de gas por una chispa, y (5) medición de la presión como función del tiempo.

Después de la ignición la onda de presión se mueve superficialmente dentro del recipiente hasta chocar con la pared. La reacción termina en la pared. La presión dentro del recipiente se mide mediante un traductor localizado en la pared externa. En la figura 3.3 se muestra una gráfica de presión contra tiempo. Experimentos de este tipo resultan de una deflagración con pocas atmósferas de incremento en la presión.

El aumento en la presión indica la propagación de la flama y por lo tanto la magnitud de la explosión. El aumento o decremento de la presión se calcula por medio del punto de inflexión de la curva de presión como se muestra en la Figura 3.3. El experimento se repite a diferentes concentraciones. La velocidad de presión y la máxima presión para cada corrida se grafican contra la concentración como se muestra en la Figura 3.4. La máxima presión y la velocidad de máxima presión se determinan dentro del rango de inflamabilidad (pero no necesariamente a la misma concentración). Usando esta selección sencilla de experimentos, las características explosivas se establecen completamente; en este ejemplo los límites de inflamabilidad están entre el 2% y el 8%, la presión máxima es 7.4 bar, y la velocidad máxima de presión alcanza 360 bar/seg (Lees, 1986).

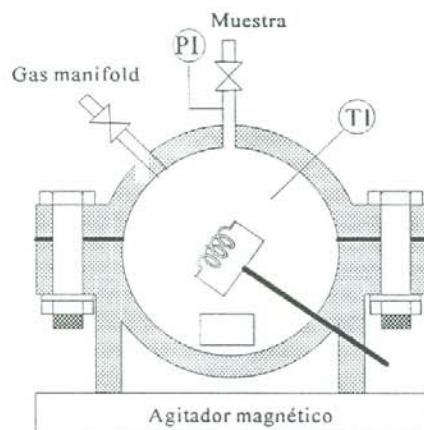


Figura 3.2 Aparato de prueba para obtener los datos de explosión para vapor.
(Bartknecht, 1981).

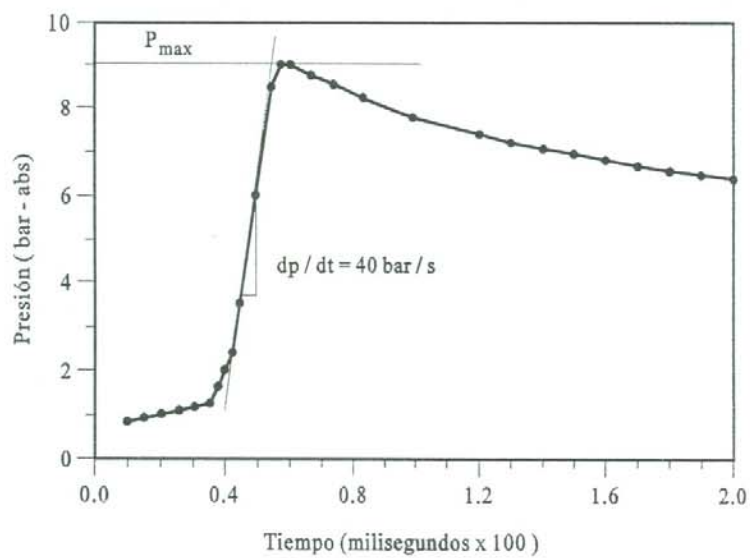


Figura 3.3 Presión típica contra los datos de tiempo obtenidos del aparato de explosión. (Bartknecht, 1981)

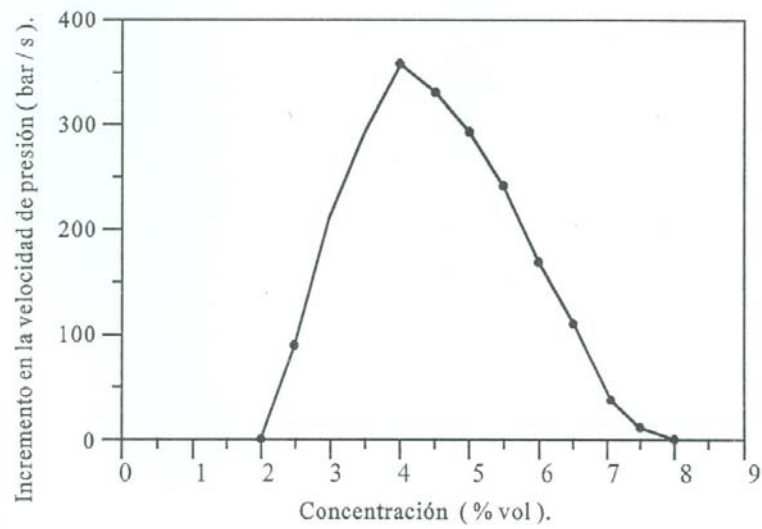
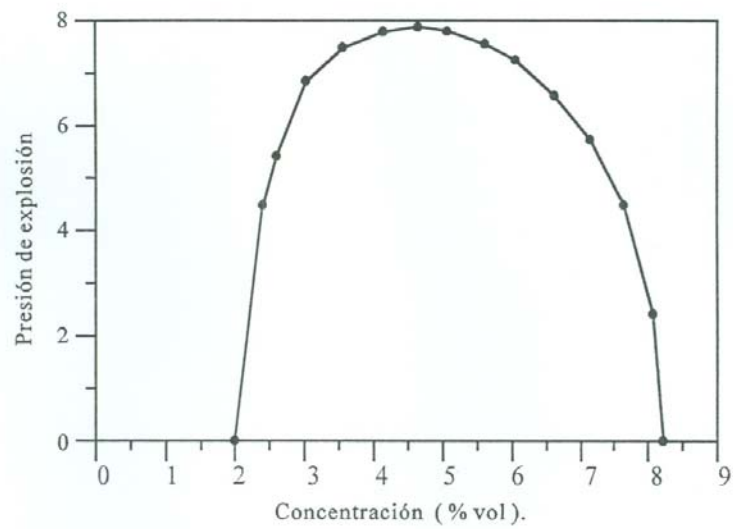


Figura 3.4 Velocidad de presión y máxima presión de explosión como función de la concentración de vapor. (Bartknecht, 1981)

Aparatos de explosión para polvos

El aparato experimental para caracterizar la naturaleza de la explosión de polvos se muestra en la Figura 3.5. Este dispositivo es similar al aparato de explosión para vapor, con la excepción de que es de volumen mas grande, con un contenedor para la adición de la muestra y un anillo de distribución de polvo. Este anillo de distribución asegura la mezcla apropiada de polvo antes de la ignición (Bartknecht, 1981).

El procedimiento experimental es el siguiente: la muestra de polvo se coloca en el contenedor. El sistema computarizado abre la válvula de selenoide y el polvo es impulsado por la presión del aire del contenedor a través del anillo del distribución dentro de la esfera de polvo. Después de varios milisegundos para asegurar una mezcla apropiada y la distribución del polvo, la aplica la ignición.

La computadora mide la presión como función del tiempo utilizando traductores de alta y baja velocidad de presión.

El aire utilizado para impulsar el polvo dentro de la esfera es cuidadosamente medido para asegurar una presión de una atmósfera (0.987 bar) dentro de la esfera a la hora de la ignición.

Los datos se recopilan y se analizan de la misma forma que en el aparato de explosión para vapores. Se determina la presión máxima y la velocidad máxima de presión, así como los límites de inflamabilidad.

Características de la explosión

Las características de explosión determinadas utilizando los aparatos de explosión para vapor y polvo se usan de la siguiente manera:

1. - Los límites de inflamabilidad o explosividad se usan para determinar las concentraciones apropiadas de operación o la cantidad de gas inerte requerido para controlar las concentraciones dentro de regiones seguras.
2. - La velocidad máxima de incremento de presión es un indicador de la fuerza de la explosión. El comportamiento de la explosión de diferentes materiales puede ser comparado en relación a una base; también se utiliza para diseñar la abertura de un recipiente, o para estabilizar el intervalo de tiempo para adicionar un inhibidor de la explosión (agua, bióxido de carbono o halon) para detener el proceso de combustión (Bartknecht, 1981).

Una gráfica logarítmica de la presión máxima contra el volumen del recipiente, frecuentemente produce una inclinación de $-1/3$, como se muestra en la Figura 3.6

Esta ley es conocida como “Ley Cúbica”

$$\left(\frac{dP}{dt}\right)_{max} V^{1/3} = \text{constante} = K_g \quad (3.1)$$

$$\left(\frac{dP}{dt}\right)_{max} V^{1/3} = K_{st} \quad (3.2)$$

donde:

K_g y K_{st} son llamados índices de deflagración para gases y polvos, respectivamente.

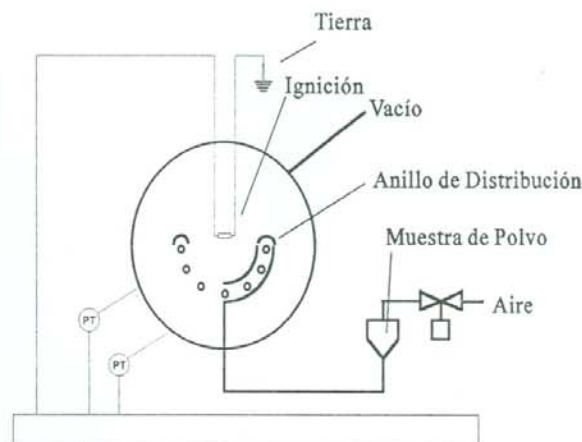


Figura 3.5 Aparato de prueba para obtener los datos de explosión para polvos.
(Bartknecht, 1981)

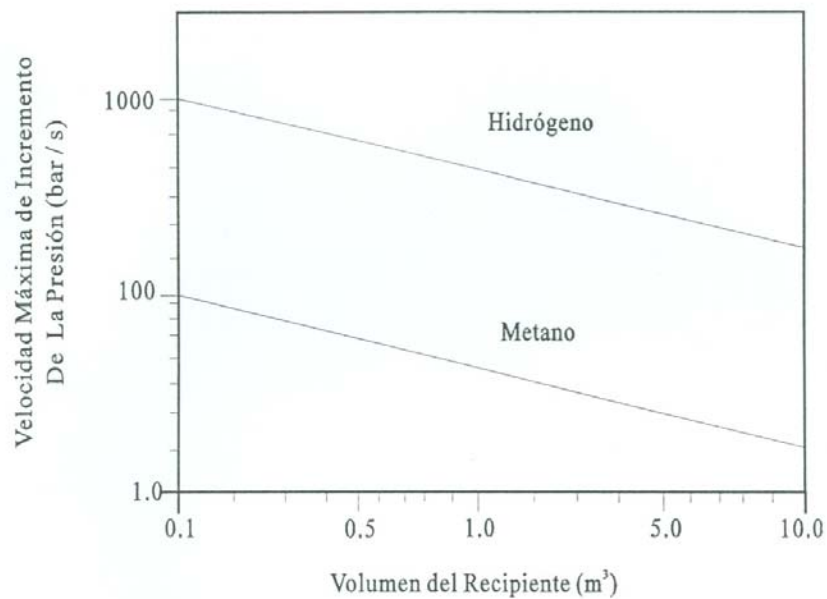


Figura 3.6 Datos de explosión típica mostrando la ley cúbica.
(Bartknecht, 1981)

Cuando se incrementa la fuerza de explosión, los índices de deflagración K_g y K_{st} aumentan. La ley cúbica muestra que la presión frontal aumenta para expandirse en un recipiente más grande. Algunos valores para K_g y K_{st} están dados en la Tabla 3.2. y 3.3.

Los polvos se clasifican en cuatro clases, dependiendo del valor de los índices de deflagración. Estas clases se muestran en la Tabla 3.3.

TABLA 3.2 VALORES DEL TÉRMINO K_g PARA GASES SELECCIONADOS.

G A S	K_g (bar m/s)
Metano	55
Propano	75
Hidrógeno	550

Bartknecht, 1981.

NOTA: Estas pruebas son corridas a condiciones ambientales con una energía de ignición de 10 J.

TABLA 3.3 VALORES DEL TÉRMINO K_{ST} PARA POLVOS SELECCIONADOS.

POLVOS	P _{max} (bar)	K _{st} (bar m/s)
PVC	6.7 - 8.5	27 - 98
Leche en polvo	8.1 - 9.7	58 - 130
Polietileno	7.4 - 8.8	54 - 131
Azúcar	8.2 - 9.4	59 - 165
Resina en polvo	7.8 - 8.9	108 - 174
Carbón negro	8.1 - 10.0	93 - 176
Polvos de madera	7.7 - 10.5	83 - 211
Celulosa	8.0 - 9.8	56 - 229
Pigmentos	6.5 - 10.7	28 - 344
Aluminio	5.4 - 12.9	16 - 750

Clases St para polvos

Índice de deflagración K _{st}	Clase St
0	St - 0
1 - 200	St - 1
200 - 300	St - 2
> 300	St - 3

Bartknecht, 1981.

Las ecuaciones 3.1. y 3.2. se utilizan para estimar las consecuencias de explosión en espacios limitados tales como edificios o recipientes, de la forma siguiente:

$$\left[\left(\frac{dP}{dt} \right)_{max} V^{\frac{1}{3}} \right]_{\text{en el recipiente}} = \left[\left(\frac{dP}{dt} \right)_{max} V^{\frac{1}{3}} \right]_{\text{experimental}} \quad (3.3)$$

El subíndice en el recipiente es para el reactor o el edificio. El subíndice *experimental* se aplica a los datos determinados en el laboratorio utilizando los aparatos de explosión para polvo o vapor. La ecuación 3.3 permite que los resultados experimentales de los aparatos de polvo o de vapor se apliquen para determinar el comportamiento de los materiales explosivos en edificios y procesos en recipientes. Las constantes K_g y K_{st} no son propiedades físicas del material debido a que dependen: (a) de la composición de la mezcla, (b) del mezclado dentro del recipiente, (c) de la condición de la reacción en el recipiente, y, (d) de la energía de la fuente de ignición (Bartknecht, 1981).

Por eso son necesarios los experimentos tan ajustados como sea posible a las condiciones reales.

Estudios experimentales indican que la máxima presión de explosión no es afectada en la mayoría de las veces, por los cambios en el volumen, y que la máxima presión y la velocidad máxima de presión son linealmente dependientes de la presión inicial. Esto se muestra en la Figura 3.7. Como la presión inicial aumenta, se localiza un punto donde la deflagración se vuelve una detonación, como se indica en la Figura 3.8. Los picos de la curva indican una detonación.

Las explosiones de polvo solo muestran un comportamiento. Estas explosiones ocurren si las partículas finamente divididas de un material sólido son dispersadas y encendidas en el aire. Las partículas de polvo pueden ser innecesarias en el producto y para el producto mismo (Bartknecht, 1981).

Las explosiones de polvo son más comunes en los molinos de harina, almacenes de grano y en las industrias mineras de carbón. Los accidentes debido a estas explosiones pueden ser muy peligrosas, una explosión en una serie de silos con grano en Westwego, cerca de New Orleans, en 1977 mato a 35 personas (Lees, 1986).

Una explosión inicial de polvo puede causar explosiones secundarias. La explosión primaria manda onda de choque a la planta, sacudiendo el polvo adicional del cual se produce una explosión secundaria. De esta manera la explosión “brinca como rana” en su camino a través de la planta. Muchas veces las explosiones secundarias son mas dañinas que las primarias.

Las explosiones de polvo son además más difíciles de representar que las explosiones con gases. Para un gas las moléculas son muy pequeñas y tienen bien definido el tamaño. Las partículas de polvo varían en su tamaño y en muchas ordenes de magnitud mas grandes que las moléculas. La gravedad también afecta el comportamiento de las partículas de polvo.

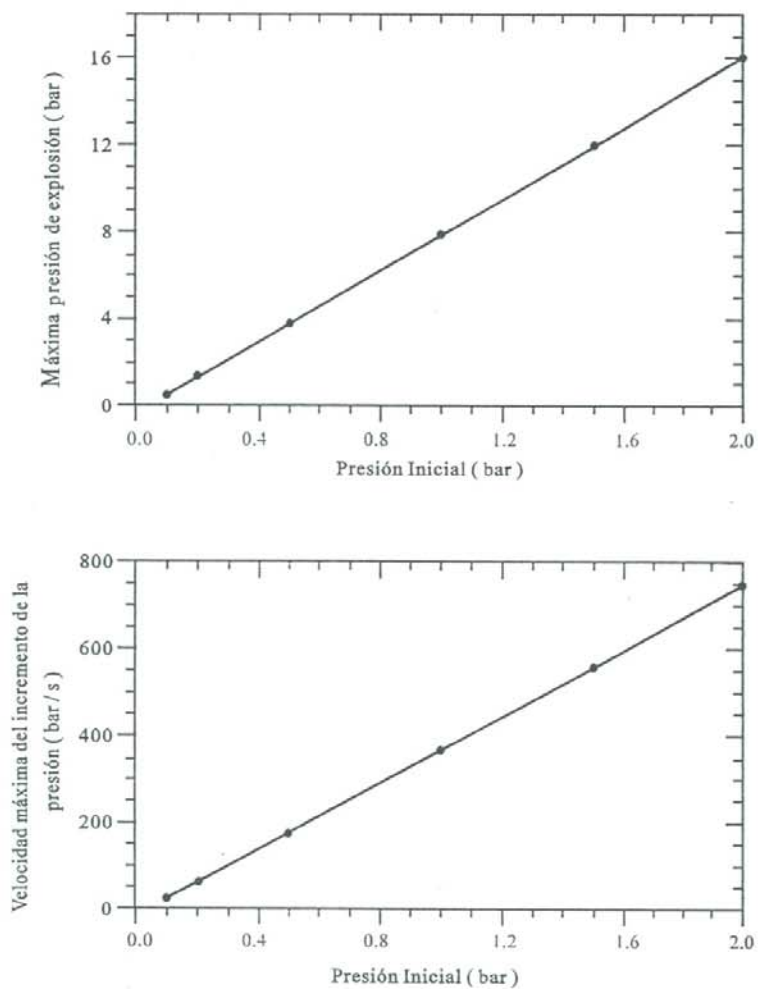


Figura 3.7 Efectos de la presión inicial en la velocidad de presión y en la máxima presión de explosión. (Bartknecht, 1981).

Para polvos la deflagración es mucho más común que las detonaciones.

Las ondas de presión de las deflagraciones de polvo son suficientemente poderosas para destruir estructuras o herir personas.

Para que una mezcla de polvo sea explosiva debe poseer las siguientes características:

- Las partículas deben de estar por debajo de cierto tamaño mínimo.
- La carga de partículas deberá estar entre ciertos límites.
- La carga de polvo debe ser uniforme.

Para muchos polvos el límite mínimo de explosión está entre 20 y 60 gm/m^3 y el máximo entre 2 y 6 Kg/m^3 (Bartknecht, 1981).

3.4 EXPLOSIONES DE NUBE DE VAPOR

Las explosiones más peligrosas y destructivas en la industria de procesos químicos son las explosiones de nubes de vapor (ENV). Esas explosiones suceden en una secuencia de pasos:

- 1.- La liberación repentina de una gran cantidad de vapor inflamable.
Esto sucede cuando se rompe un recipiente que contiene un líquido sobrecalentado y presurizado.
- 2.- La dispersión del vapor a través de la planta mientras se mezcla con el aire.
- 3.- Ignición de la nube de vapor resultante.

El accidente ocurrido en Flixborough, Inglaterra, es un ejemplo clásico de una explosión causada por una nube de vapor. Una falla repentina de una línea de ciclohexano en los reactores originó la vaporización de 30 toneladas de ciclohexano. La nube de vapor se disperso por todos los sitios de la planta y se extendió por una fuente desconocida 45 segundos después de ser liberado. Todos los sitios de la planta fueron desalojados y 28 personas murieron.

En resumen, de 29 explosiones de nube de vapor en el periodo comprendido de 1974 a 1986 se registraron pérdidas de propiedad por cada explosión entre \$5'000,000.00 a 100'000,000.00 y 140 muertes (un promedio de casi 13 personas por año) (Prugh, 1987).

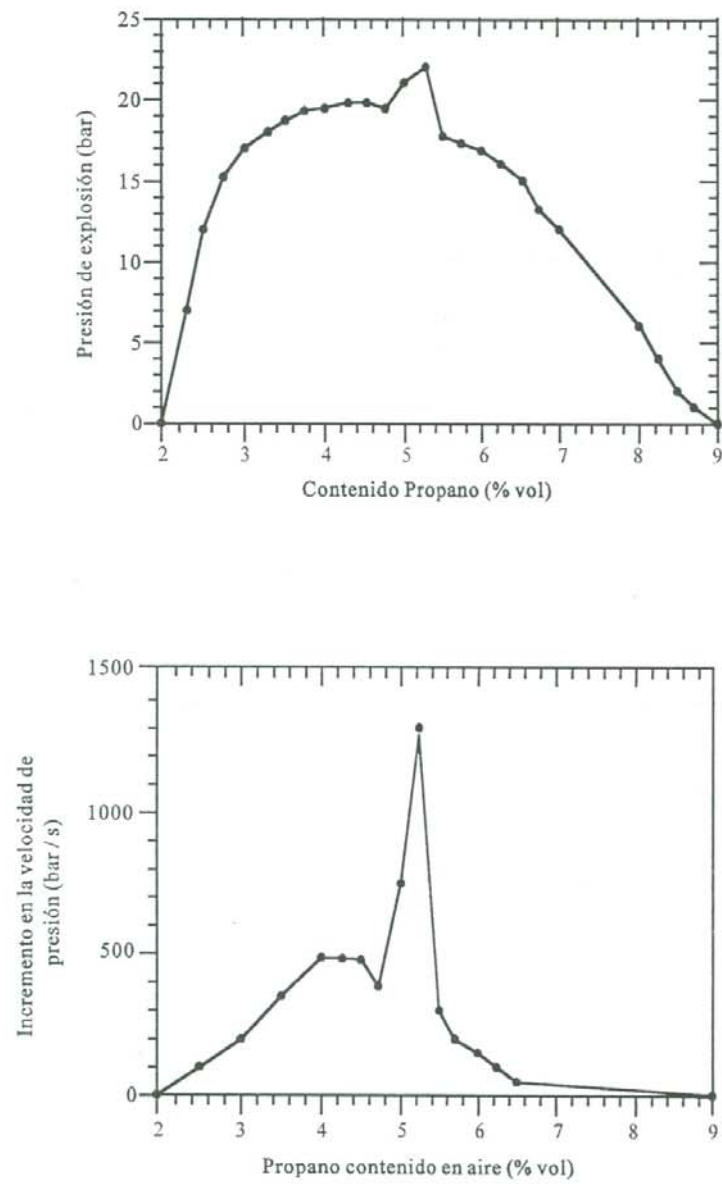


Figura 3.8 Datos de explosión para el propano indicando el punto máximo de inicio de detonación. (Bartknecht, 1981).

Las ENV han aumentado debido al incremento en la utilización de materiales inflamables en las plantas de proceso y a las operaciones en las más severas condiciones.

Cualquier proceso que contiene cantidades de gases licuados volátiles a altas temperaturas, o gases a altas presiones, o líquidos sobrecalentados, se considera como buen candidato para una ENV.

Las ENV son difíciles de representar, primeramente debido al gran número de parámetros que son necesarios para describir un evento. Los accidentes ocurren bajo circunstancias incontrolables. Los datos obtenidos en situaciones reales la mayoría de las veces no son confiables y son difíciles de comparar.

Algunos de estos parámetros que afectan el comportamiento de la ENV son (Lees, 1986).

- La cantidad de material liberado.
- La fracción de material vaporizado.
- La probabilidad de ignición de la nube.
- La distancia recorrida por la nube previa a la ignición.
- El tiempo de retraso antes de la ignición de la nube.
- La probabilidad de la explosión en vez de incendio.
- La existencia de una cantidad de material al inicio.
- La eficiencia de la explosión, y.
- La localización de una fuente de ignición con respecto a la liberación.

Estudios cualitativos han demostrado que (a) la probabilidad de ignición se incrementa a medida que aumenta la nube de vapor, (b) los incendios con nubes de vapor son más comunes que las explosiones (c) la eficiencia de la explosión es pequeña; aproximadamente el 2% de la energía de combustión se convierte en una ráfaga de viento, y (d) las mezclas turbulentas de vapor y aire, y la ignición de la nube en un punto remoto desde la liberación, aumentan el impacto de la explosión (Prugh, 1987).

Lo más seguro es prevenir la liberación de material. Una nube grande de material combustible es muy peligrosa y casi siempre difícil de controlar, evade cualquier sistema de seguridad instalado para prevenir igniciones.

Los métodos usados para prevenir las ENV incluye: mantener poco inventario de volátiles, usar condiciones de procesos que minimizen el chispeo, si un recipiente o tubería se rompe, utilizar analizadores para detectar las fugas a concentraciones bajas; e instalar válvulas automatizadas para detener los sistemas.

3.5 EXPLOSIONES DE VAPOR POR LA EXPANSIÓN DE LÍQUIDOS EN EBULLICIÓN (EVELE)

Este tipo de explosiones puede liberar grandes cantidades de materiales. Si los materiales son inflamables, puede originarse una explosión de nube de vapor; si son tóxicos, una gran área puede estar expuesta a estos materiales. La energía liberado por las EVELE puede causar grandes daños.

Las EVELE ocurren cuando un tanque que contiene un líquido arriba de la presión atmosférica se rompe en el punto de ebullición, resultando una explosiva vaporización de una gran fracción del contenido del tanque.

Las EVELE son ocasionadas por una falla repentina en el contenedor por alguna causa. El tipo más común de EVELE es causado por incendio. Las etapas son las siguientes (Lees, 1986; Bodurtha, 1980).

1. Un incendio que se desarrolla junto a un tanque que contiene el líquido.
2. El calor del fuego calienta las paredes del tanque.
3. Las paredes del tanque por abajo del nivel del líquido son enfriadas por el líquido, incrementando la temperatura del líquido y la presión en el tanque.
4. Si las llamas alcanzan las paredes del tanque o el techo donde solo hay vapor y no líquido para eliminar el calor, la temperatura del metal del tanque se incrementa hasta perder la resistencia estructural.
5. El tanque se rompe, y su contenido se evapora explosivamente.

Si el líquido es inflamable y el fuego es la causa de la EVELE, podría encenderse cuando el tanque se rompa. Frecuentemente el líquido se comporta como combustible de un cohete, propagándose por el recipiente a grandes distancias. Si la EVELE no es causada por el fuego se formará, una nube de vapor, resultando una explosión por nube de vapor. Los vapores son también peligrosas para el personal causando quemaduras en la piel o efectos tóxicos.

Cuando ocurre una explosión de vapor por la expansión de líquido en ebullición en un recipiente, solo una fracción de líquido se vaporiza; la cantidad depende de las condiciones físicas y termodinámicas del contenido del recipiente.

Daños por ráfagas debido a una sobrepresión

La explosión de polvo o gas (ambas como deflagración o detonación) es el resultado de una reacción externa de movimiento frontal desde la fuente de ignición precedida por una onda de choque o presión frontal. Después de que el material combustible se consume, la reacción frontal termina, pero la presión de la onda continúa su movimiento externo. Una ráfaga de onda se compone de la onda de presión y de viento. Es esta ráfaga de onda la que causa mayor daño

Los daños de las ráfagas se basan en la determinación del punto máximo de presión resultado de la onda de choque en la estructura. En general, el daño es también función del incremento de la velocidad de presión y de la duración de la ráfaga de onda.

Los daños producidos por las sobrepresiones se muestran en la Tabla 3.4

Experimentos con materiales explosivos han demostrado que la sobrepresión puede ser estimada utilizando TNT, denotada por M_{tnt} , y la distancia desde el punto cero de la tierra a la explosión, denotada por r . Entonces la ley de escala empírica es:

$$Z_c = \frac{r}{(m_{\text{TNT}})^{1/3}} \quad (3.4)$$

La energía equivalente de TNT es 1120 Cal/gm.

La Figura 3.9 nos da la correlación para sobrepresiones (psia) contra la medición del parámetro, Z_c (pies/lb^{1/3}) de la ecuación 3.4 la Figura 3.10 nos da la correlación en unidades SI: la sobrepresión es en KPa y la medición del parámetro, Z_c esta en m/Kg^{1/3}.

Las condiciones climáticas también afectan a la sobrepresión. Las funciones superior e inferior de la Figura 3.9 se usan para condiciones climáticas anormales, mientras que la función central se utiliza en condiciones normales (Baker, 1973).

El procedimiento para estimar la sobrepresión para cualquier distancia, r , debido a la explosión de la masa del material es el siguiente: (1) calcular la energía de la explosión mediante procedimientos termodinámicos ya establecidos, (2) Convertir la energía para una cantidad equivalente de TNT, (3) utilizar la ley de escala y las correlaciones de las Figuras 3.9 y 3.10 para estimar la sobrepresión, y (4) usar la Tabla 3.4 para estimar el daño (Clancey, 1972).

Ejemplo 3.1

Se explota un Kg de TNT. Calcule la sobrepresión a una distancia de 30m desde la explosión.

Solución

El valor del parámetro, Z_c se determina usando la ecuación 3.4

$$Z_c = \frac{r}{(m_{TNT})^{1/3}}$$

$$Z_c = \frac{30m}{(1.0Kg)^{1/3}} = 30m Kg^{-1/3}$$

De la Figura 3.10, la sobrepresión estima es de 2.4 kP=0.35psia. De acuerdo con la Tabla 3.4, esta es suficiente para destrozar las ventanas de vidrio.

TABLA 3.4 DAÑOS PRODUCIDOS POR LA SOBREPRESIÓN

SOBREPRESIÓN (PSIG)	D A Ñ O
0.03	Ventanas de vidrio grandes son fácilmente quebradas.
0.04	Ruidos fuertes.
0.15	Presión típica por la ruptura del vidrio.
0.30	95% de probabilidad de que no haya daños serios.
0.5 - 1	Ventanas grandes y pequeñas usualmente destrozadas.
0.7	Daños pequeños en las casas.
1	Demolición parcial a casas no habitadas.
1.3	Estructura de acero ligeramente deformado.
2 - 3	Concreto no reforzado o paredes destrozadas.
2.3	Límites más bajos de daños serios en las estructuras.
3 - 4	Ruptura de tanques de almacenaje de aceite.

Clancey, 1972.

Daños por proyectiles.

Una explosión que ocurre en un recipiente confinado o en una estructura puede romper el recipiente o estructura resultando el lanzamientos de desechos, a lo largo del área. Estos desvíos, o proyectiles, pueden causar gran daño a la gente o a las estructuras y

al equipo de proceso. Las explosiones en espacios libres crean también proyectiles por el impacto de ráfaga de onda y subsecuente traslación de estructuras (Clancey, 1972).

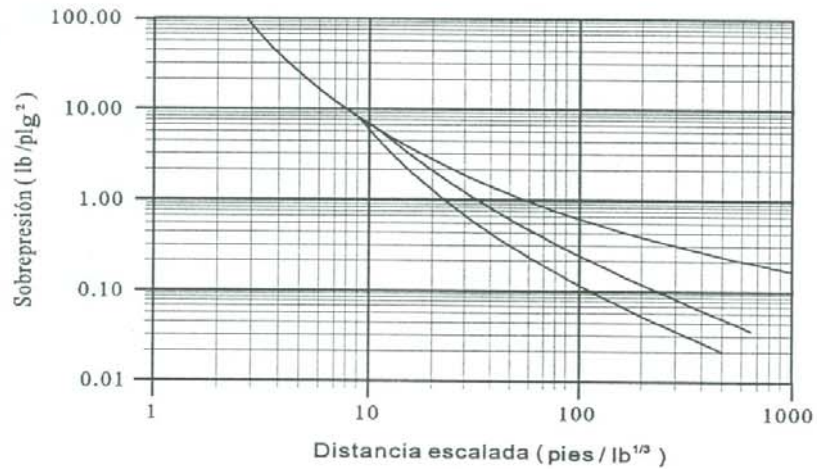


Figura 3.9 Relación entre la sobre presión y la distancia escalada.
Unidades ingenieriles en inglés.

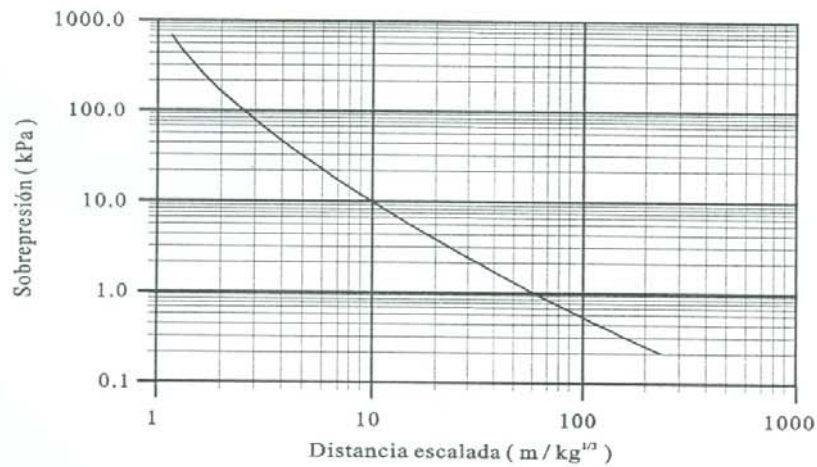


Figura 3.10 Relación entre la sobrepresión y la distancia escalada.
Unidades SI. (Clancey, 1972)

Los proyectiles son el medio por el cual un accidente se propaga con facilidad a través de toda la planta. Una explosión localizada en una parte de la planta lanza desechos por todas partes de la planta, los cuales se impactan en los tanques de depósito, equipo de proceso y las líneas de tuberías, dando como resultados incendios o explosiones secundarios.

V.J Clancey* desarrolló una relación entre la masa del material explosivo y el rango horizontal máximo de fragmentos como se muestra en la Figura 3.11. Esta relación es útil durante las investigaciones de accidentes, para calcular el nivel de energía requerida para lanzar fragmentos a distancias observadas.

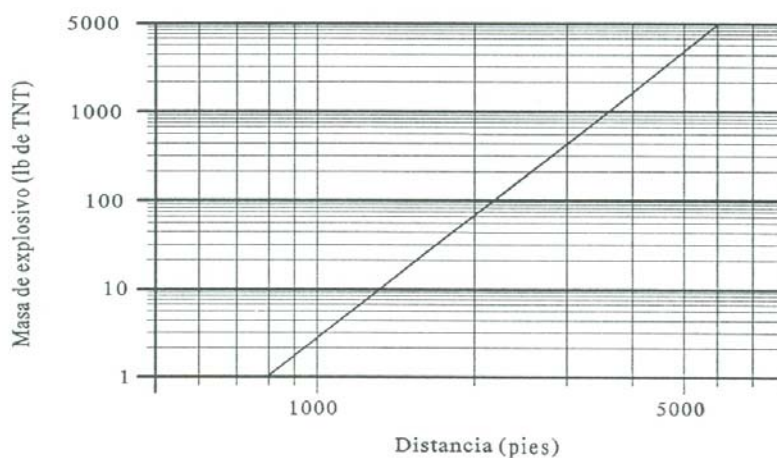


Figura 3.11 Rango máximo horizontal de ráfagas de fragmentos.
(Clancey, 1972)

Daños a personas causados por ráfaga.

Las personas deben ser aseguradas contra efectos directos de las explosiones de ráfagas (incluyendo sobrepresión y radiación térmica) o efectos indirectos de ráfagas (mayormente daños por proyectiles).

*V.J. Clancey "DIAGNOSTIC FEATURES OF EXPLOSION DAMAGE", Sixth Int. Mtg. of Forensic Sciences, Edinburgh, 1972.

Ejemplo 3.2

Un reactor contiene el equivalente de 10,000 lb de TNT. Si explota, estimar el daño a personas y estructuras a 500 pies de distancia.

Solución

La sobrepresión se determina utilizando la ecuación 3.4 y la Figura 3.9. La distancia medida es:

$$Z_c = \frac{r}{(m_{TNT})^{1/3}}$$

$$Z_c = \frac{500 \text{ pies}}{(10,000 \text{ lb})^{1/3}} = 23.2 \text{ pies/Lb}^{1/3}$$

de la Figura 3.9 la sobrepresión es de 1.8 psia. La Tabla 3.4 indica que los daños a las casas serían grandes.

El daño a las personas se determina usando las ecuaciones de probabilidad unitaria (probit) siguientes:

La ecuación para muertes debido a hemorragias del pulmón es:

$$y = -77.1 + 6.91 \ln P \quad (3.5)$$

La ecuación para calcular el daño a los oídos es:

$$y = -15.6 + 1.93 \ln P \quad (3.6)$$

donde:

P es la sobrepresión en N/m^2

$$P = \left(\frac{1.8 \text{ psia}}{14.7 \text{ psia / atm}} \right) (101,325 \text{ N / m}^2 \text{ atm})$$

$$P = 12,400 \text{ N/m}^2$$

sustituyendo en las ecuaciones,

$$Y_{\text{fallecimiento}} = -77.1 + 6.91 \ln(12,400) = -11.9$$

$$Y_{\text{oído}} = -15.6 + 1.93 \ln(12,400) = 2.59$$

La Tabla 3.5 ayuda a convertir estas probabilidades unitarias en porcentajes. Los resultados muestran que no hay muertes y menos del 0.1% de la gente expuesta sobre ruptura en el oído. En la figura 3.11 se observa que esta explosión puede proyectar fragmentos hasta una distancia máxima de 6,000 pies.

TABLA 3.5 TRANSFORMACIÓN DE PROBABILIDADES UNITARIAS EN PORCENTAJE.

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	--	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.0	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
%	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
99	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.75	7.88	8.09

Finney, 1971.

3.6 ENERGÍA DE EXPLOSIONES MECÁNICAS

Para explosiones mecánicas la energía se relaciona con el contenido de la energía en el sistema; por ejemplo, una explosión de un cilindro de aire comprimido libera su energía de compresión.

Los estudios demuestran que la liberación de gases en una explosión de un recipiente se expande isoentrópicamente. La máxima sobrepresión es la explosión descargada desde el recipiente.

Para una expansión isoentrópica de un gas ideal, el trabajo de expansión es.

$$W_e = \int_1^2 p dv = \frac{(P_2 V_2 - P_1 V_1)}{(\gamma - 1)} \quad (3.7)$$

donde:

γ es la relación de la capacidad de calor (C_p/C_v), P es la presión, V es el volumen y los subíndices 1 y 2 representan los estados inicial y final, respectivamente. La ecuación 3.7 es reinscrita por la substitución de V_2 , volumen de expansión final

$$W_e = \left(\frac{P_1 V_1}{\gamma - 1} \right) \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(\gamma - 1)}{\gamma}} \right] \quad (3.8)$$

donde:

V_1 es el volumen del gas dentro del contenedor antes de la ruptura. La ecuación 3.8 es válida para gases comprimidos.

La liberación de energía por los líquidos comprimidos es generalmente pequeña, ya que los líquidos son en su mayor parte incompresibles. Por esta razón, la presión en recipientes es normalmente ensayada con líquidos; si se rompe el recipiente lleno de líquido, se libera muy poca energía (Crowl y Louvar 1990).

Ejemplo 3.3

Calcular la energía de explosión de 1kg-mol de aire a 100 atm y 20°C. considerar que $\gamma = 1.4$. Determinar la cantidad equivalente de TNT.

Solución

De la ley de gases ideales

$$V_1 = \frac{RgT}{P_1} = \frac{(82.06 \text{ lts atm} / \text{Kg mol } ^\circ\text{K}) (20+273)^\circ\text{K}}{(101 \text{ atm})} = 238 \text{ lts}$$

Sustituyendo en la ecuación 3.8 para calcular el trabajo de expansión.

$$We = \left(\frac{P_1 V_1}{\gamma - 1} \right) \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} \right]$$

$$We = \left[\frac{(101 \text{ atm})(238 \text{ lts})}{1.4 - 1} \right] \left[1 - \left(\frac{1 \text{ atm}}{101 \text{ atm}} \right)^{\frac{0.4}{1.4}} \right] = 44,000 \text{ lt-atm} = 1.06 \times 10^6 \text{ cal}$$

la cantidad equivalente de TNT debido a esta explosión es:

$$\text{TNT equivalente} = 1.06 \times 10^6 \text{ cal} / (1120 \text{ cal} / \text{gm TNT}) = 0.95 \text{ kg TNT}$$

Los tanques que contienen gases comprimidos a altas temperaturas son comunes en plantas químicas y laboratorios. Esta clase de tanques deben ser manejados cuidadosamente cuando contienen una cantidad considerable de energía explosiva.

3.7 ENERGÍA DE EXPLOSIONES QUÍMICAS

La ráfaga de onda que sigue a una explosión química se genera mediante dos mecanismos: calentamiento de los productos de reacción y el cambio en el número de moles por la reacción (Crowl y Louvar 1990).

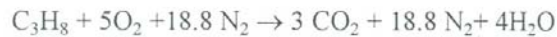
Si la reacción ocurre tan rápidamente que el volumen no cambia, y el gas es ideal, la máxima presión después de la explosión es:

$$P_f = \frac{P_i \eta_f T_f}{\eta_i T_i} \quad (3.9)$$

donde:

P es la presión, η es el número de moles, T es la temperatura, y los subíndices i y f denotan los estados inicial y final, respectivamente.

Para la combustión completa del propano en aire, se aplica la siguiente ecuación estequiométrica:



Las moles iniciales y finales son:

$$\eta_i = 24.8$$

$$\eta_f = 25.8$$

En este caso solamente ocurre un pequeño incremento de presión, debido al cambio en el número de moles y casi toda la energía de la ráfaga de onda es debido a efectos térmicos. Esto es típico en algunos gases, particularmente aquellos que explotan en el aire (Crowl y Louvar 1990).

La energía liberada durante una reacción de explosión se calcula utilizando ecuaciones termodinámicas. La energía liberada es igual al trabajo. Este trabajo se basa en un proceso a temperatura constante con toda la energía química convertida a trabajo PdV; por eso, este es el máximo trabajo derivado para este proceso. En realidad, habrá otros incrementos en la temperatura; el trabajo real será menor que el determinado por la ecuación 3.7. Esta ecuación no es conveniente para cálculos de energía, una aproximación más útil es relacionar este proceso a los estados termodinámicos iniciales y finales. En este caso, la energía máxima liberada está dada por la energía libre de Helmholtz A.

$$dA = -SdT - pdV \quad (3.10)$$

Para procesos a temperatura constante

$$dA = -pdV \quad (3.11)$$

Otras expresiones termodinámicas necesarias para el cálculo de la energía de una explosión química son:

$$\Delta A = (\Delta A^{\circ}_F)_p - (\Delta A^{\circ}_F)_R \quad (3.12)$$

$$\Delta A = \Delta U - T\Delta S \quad (3.13)$$

$$\Delta U = (\Delta U^{\circ}_F)_p - (\Delta U^{\circ}_F)_R \quad (3.14)$$

$$\Delta S = S_p - S_R \quad (3.15)$$

$$S = S^{\circ} - Rg \sum x_i \ln x_i \quad (3.16)$$

donde:

los subíndices P y R denotan los productos y reactantes, respectivamente, y

ΔA°_F = Energía libre de Helmholtz en el estado estándar

ΔU°_F = Energía interna en el estado estándar

x_i = Fricción molar de la especie i

S° = Entropía en el estado estándar, y

Rg = Constante del gas ideal.

El término $\ln$ en la ecuación 3.16 representa el cambio de entropía del mezclado.

Ya que muchas explosiones ocurren en condiciones ambientales, la energía de explosión se calcula en condiciones normales, 25° C y 1 atm. Esto es conveniente debido a que están disponibles las propiedades en condiciones normales.

La Tabla 3.6 contiene los datos termodinámicos útiles para estos cálculos.

Existen dos métodos para calcular la energía de una explosión química utilizando las relaciones anteriores:

1. Si los datos de la energía libre de Helmholtz para reactantes y productos están disponibles, usar las ecuaciones 3.11 y 3.12, o
2. usar las ecuaciones 3.11 y 3.13 a las 3.16 en caso de que sean conocidas la energía interna y entropías para cada especie en condiciones normales

Frecuentemente, sin embargo, los datos termodinámicos no están disponibles para calcular la energía de explosión. En este caso se utilizan ciertas aproximaciones. Primeramente, si los datos de la energía interna no están disponibles, la energía libre de Helmholtz, A , no puede ser calculada usando la ecuación 3.12. Una buena aproximación es asumir que el cambio de energía interna es igual al cambio de entalpía. Similarmente, la energía libre de Gibbs puede usarse en lugar de la energía libre de Helmholtz.

Finalmente, a menos que el cambio en el peso molecular durante la reacción sea grande el término $T\Delta S$ es pequeño y puede eliminarse (Lees, 1986).

TABLA 3.6 PARÁMETROS TERMODINÁMICOS SELECCIONADOS PARA CALCULOS DE EXPRESIONES.

ESPECIE	ESTADO	ΔU_r°	ΔH_r°	ΔA_r°	ΔG_r°	S°	ΔH_c°
C (grafito)	s	0	0	0	0	1.3609	-94.052
CO	g	-26.722	-26.416	-33.104	-32.808	47.301	-67.636
CO ₂	g	-94.052	-94.052	-94.260	-94.260	51.061	--
H ₂	g	0	0	0	0	31.211	-68.317
H ₂ O	g	-57.502	-57.798	-56.339	-54.636	45.106	--
N ₂	g	0	0	0	0	45.767	--
O ₂	g	0	0	0	0	49.003	--
Acetileno	g		54.194		50.000	47.997	-310.615
Benceno	g		19.820		30.989	64.340	-789.080
n-Butano	g		-30.150		-4.100	74.120	-687.982
Ciclohexano	g		-29.430		7.590	71.280	-936.880
Etano	g		-20.236		-7.860	54.850	-372.820
Etileno	g		12.496		16.282	52.450	-337.234
Metano	g		-17.889		-12.140	44.500	-212.798
Propano	g		-24.820		-5.614	64.510	-530.605
Propileno	g		4.879		14.990	63.800	-491.987
Estireno	g		35.220		51.100	82.480	--
TNT	s	-13.0				65.000	

Unidades: ΔU_r° , ΔH_r° , ΔG_r° , ΔH_c° en Kcal/mol, S° en cal/mol °K

Ejemplo 3.4.

Calcular la energía de explosión para TNT de acuerdo a la siguiente reacción.



El peso molecular del TNT es 227.

Solución

Los datos termodinámicos se obtienen de la Tabla 3.6 ΔU de la explosión se calcula directamente de los datos, usando la ecuación 3.14,

$$\Delta U = (\Delta U^\circ_F)_p - (\Delta U^\circ_F)_R$$

$$\begin{aligned}\Delta U &= \{ (1 \times 0) + [6 (-26.722)] + (2.5 \times 0) + (1.5 \times 0) \} - [1 (-13.0)] \\ &= -147 \text{ k cal / mol} \\ &= -648 \text{ cal /gm de TNT}\end{aligned}$$

La entropía de la explosión se calcula de acuerdo a las ecuaciones 3.15 y 3.16.

$$\Delta S = (S^\circ)_p - Rg \sum xi \ln xi - (S)_R$$

y la entropía de los términos mezclados son.

Especies	xi	$xi \ln xi$
CO	0.6	- 0.3065
H ₂	0.25	- 0.3466
N ₂	0.15	- 0.2846

$$- Rg \sum xi \ln xi = - (1.987 \text{ cal /gm mol } ^\circ\text{K}) (-0.9377) = 1.863 \text{ cal / gm mol } ^\circ\text{K}$$

El cambio en la entropía durante la explosión es:

$$\begin{aligned}\Delta S &= 1 \times 1.361 + 6 \times 47.301 + 2.5 \times 31.211 + 1.5 \times 45.767 + 10 \times 1.863 - 1 \times 65 \\ &= 385.5 \text{ cal / mol } ^\circ\text{K}\end{aligned}$$

La energía de la explosión esta dada por la ecuación 3.13

$$\begin{aligned}\Delta A &= \Delta U - T\Delta S \\ &= -147,000 - (298 \times 385.5) \\ &= -262,000 \text{ Cal/mol} \\ &= -1154 \text{ Cal/gr de TNT}\end{aligned}$$

El valor experimental es 1120 Cal/gr

Otras rutas para determinar el trabajo de expansión PdV son descritas por Lees*

Los métodos descritos son los más comúnmente usados.

*Lees, F. P., "LOSS PREVENTIION IN THE PROCESS INDUSTRIES"
Butterworths