

En el reactor de neutralización de una planta de nitrato amónico (fig. 1) que trabaja a 2 at se introduce amoníaco anhidro líquido a 25°C y ácido nítrico del 50%p previamente calentado a 140°C. La relación de caudales molares amoníaco/ac. nítrico(100%) es de 0.95/1. Suponiendo un rendimiento del NH_3 del 99.5% se pide:

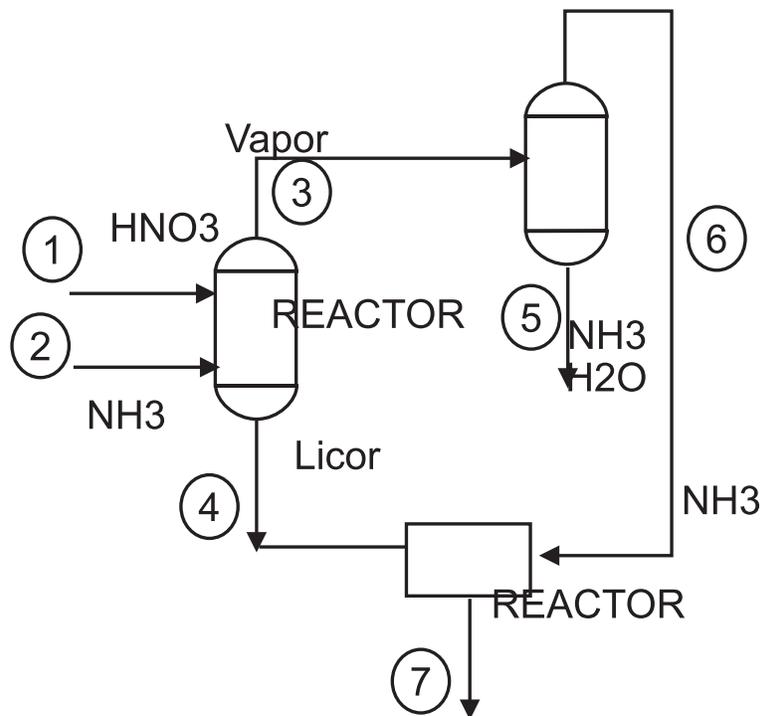


Figura 1:

• Pregunta 1:

- Concentración del licor de nitrato amónico formado en la reacción.
- Concentración de amoníaco no convertido en el vapor saliente del reactor.
- Temperatura a la que tiene lugar la reacción.

• Pregunta 2:

Calcular la relación entre los caudales de amoníaco y ácido nítrico para conseguir una corriente (7) libre de ácido nítrico. El equipo B permite separar el 80% del amoníaco presente en la corriente (3).

DATOS:

- Calor de reacción a 0°C -35090kcal/kmol
- Calor específico medio del ácido nítrico al 50% 0.6kcal/kg $^{\circ}\text{C}$
- Calor de vaporización del amoníaco a 0°C 328.3kcal/kg
- Entalpía-composición del licor de nitrato amónico-agua
- Diagrama de Mollier del vapor de agua

NOTAS:

- a. Supóngase que el ácido nítrico no se vaporiza ni se descompone.
- b. Utilícese el diagrama entalpía-composición adjunto para el cálculo de las propiedades del licor de nitrato amónico producido.

Solución

Tomamos como base de cálculo 1000kg/h de amoníaco anhidro. Como la relación con el ácido nítrico es 0.95/1 podemos calcular la cantidad de ácido alimentado:

Moles de amoníaco: $1000/17 = 58.5\text{kmol/h}$

$F_{\text{①},\text{HNO}_3} = 58.5/0.95 = 61.9\text{kmol/h} \Rightarrow M_{\text{①},\text{HNO}_3} = 3900.9\text{kg/h}$

$F_{\text{①}} = 3900.9/0.5 = 7801.9\text{kg/h}$ y $\text{H}_2\text{O} = 3900.9\text{kg/h}$

	Corr.	①	Corr.	②	Corr.	③	Corr.	④
	kg/h	%p	kg/h.	%p	kg/h.	%p	kg/h.	%p
HNO ₃	3900.9	0.5	0	0		?		?
NH ₃	0	0	1000	1		?		?
H ₂ O	3900.9	0.5	0	0		?		?
N.A.	0	0	0	0		0		?
TOTAL	7801.9	1	1000	1	?	1	?	1

Número de incógnitas: 9 + 1 reacción.

Número de ecuaciones:

Balances de materia: 4

Restricciones (Sumatorios): 2

Especificaciones: 3 (Rendimiento, no vaporización del ácido y amoníaco no reaccionado sólo en la fase vapor)

TOTAL: 9

Grados de Libertad: $9 - 10 = -1$ luego el problema no está lo suficientemente especificado. Hacemos el análisis añadiendo el balance de energía.

	Corr.	①	Corr.	②	Corr.	③	Corr.	④
	kg/h	%p	kg/h.	%p	kg/h.	%p	kg/h.	%p
HNO ₃	3900.9	0.5	0	0		?		?
NH ₃	0	0	1000	1		?		?
H ₂ O	3900.9	0.5	0	0		?		?
N.A.	0	0	0	0		0		?
TOTAL	7801.9	1	1000	1	?	1	?	1
Temperatura		140°C		25°C		?		?

Número de incógnitas: 9 + 1 reacción + 2 = 12.

Número de ecuaciones:

Balances de materia: 4

Restricciones (Sumatorios): 2

Especificaciones: 3 (Rendimiento, no vaporización del ácido y amoníaco no reaccionado sólo en la fase vapor)

Balance de energía: 1

Especificación: 1 (Equilibrio Líquido-Vapor $T_3 = T_4$)

Especificación: 1 (Relación T-x del licor de nitrato amónico en equilibrio con su vapor) TOTAL: 12

Grados de libertad = $12 - 12 = 0$. Problema bien especificado.

Tal y como se muestra con el análisis de los grados de libertad es necesario resolver conjuntamente los balances de materia y energía para llegar a la solución del problema. Tras plantear los balances de materia tendremos una incógnita y es el reparto de agua entre el licor y el vapor en equilibrio con él. Para resolverla hay que iterar: se supone una cantidad de agua en el licor, mediante el diagrama de h-x del licor se halla la temperatura a la que está y su entalpía y se comprueba si se cumple el balance de entalpía (que no tendrá ninguna incógnita) si no se cumple se supone otra cantidad de agua en el licor y así sucesivamente.

Dado que conocemos el rendimiento de amoníaco tenemos:

$$\eta = \frac{N.A.\text{producido}}{N\text{H}_3\text{alimentado}} \Rightarrow N.A.\text{prod} = 0.995 * 1000/17 = 58.5\text{kmol/h}$$

BALANCES DE MATERIA:

Nitrato Amónico: $N_{(4),NA} = \xi \Rightarrow N_{(4),NA} = 58.5\text{kmol/h}$

$M_{(4),NA} = N_{(4),NA} * 80 = 4682.4\text{kg/h}$

Amoníaco: $N_{(3),NH_3} = N_{(2),NH_3} - \xi = 1000/17 - 58.5 = 0.29\text{kmol/h}$

$M_{(3),NH_3} = N_{(3),NH_3} * 17 = 5\text{kg/h}$

Ácido Nítrico: $N_{(4),HNO_3} = N_{(1),HNO_3} - \xi = 61.9 - 58.5 = 3.4\text{kmol/h}$

$M_{(4),HNO_3} = N_{(4),HNO_3} * 63 = 213.56\text{kg/h}$

Agua: $N_{(1),H_2O} = N_{(3),H_2O} + N_{(4),H_2O}$

Debido a que no se vaporiza el ácido $N_{(3),HNO_3} = 0$ y como el amoníaco no convertido se queda en la fase vapor $N_{(4),NH_3} = 0$. La tabla de composiciones queda:

	Corr.	①	Corr.	②	Corr.	③	Corr.	④
	kg/h	%p	kg/h.	%p	kg/h.	%p	kg/h.	%p
HNO ₃	3900.9	0.5	0	0	0	0	213.56	
NH ₃	0	0	1000	1	5		0	0
H ₂ O	3900.9	0.5	0	0		?		?
N.A.	0	0	0	0	0	0	4682.4	
TOTAL	7801.9	1	1000	1	?	1	?	1

BALANCE ENTÁLPICO:

Se toman como entalpías de referencia NH₃(g), HNO₃(l), H₂O(l) y N.A.(l) a 0°C.

$$F_{(1)} \cdot h_{(1)} + F_{(2)} \cdot h_{(2)} = F_{(3)} \cdot h_{(3)} + F_{(4)} \cdot h_{(4)} + m_{\text{reacc}} \cdot H_{\text{reacc}}$$

Entalpía de los reactivos:

$F_{(1)} \cdot h_{(1)} = 7801.9 * 0.6 * (140 - 0) = 655360\text{kcal/h}$. NOTA: Habría que añadir un término de dilución del ácido, dado que no se da el dato hay que suponer su influencia despreciable.

$F_{(2)} \cdot h_{(2)} = 1000 * (-328.3) = -328300\text{kcal/h}$. Dado que entra como líquido y la referencia es en estado gaseoso (referencia usada en el calor de reacción). Faltaría un término correspondiente $1000 * C_p * (25-0)$ pero dado que no se da el calor específico se desprecia frente a la vaporización.

Calor de reacción:

$$m_{\text{reacc}} \cdot H_{\text{reacc}} = 58.5 * (-35090) = -2052765\text{kcal/h}$$

La suma de estos 3 términos queda:

$$2052765 - 328300 + 655360 = 2379825 = F_{(3)} \cdot h_{(3)} + F_{(4)} \cdot h_{(4)}$$

Ahora iteramos sobre la cantidad de agua en el licor, calculamos la entalpía de los productos y la comparamos con el valor obtenido anteriormente, si coincide paramos la iteración si no realizamos otra suposición de la cantidad de agua en el licor.

Suponemos $M_{(3),H_2O} = 2000\text{kg/h}$

$$\text{Concentración del licor } 4682/(2000 + 4682 + 213.56) = 0.679$$

Temperatura del licor (ver diagrama) $T_{(4)} = 158\text{C}$

$$\text{Entalpía del licor (ver diagrama) } h_{(4)} = 124\text{Kcal/kg} \Rightarrow F_{(4)} \cdot h_{(4)} = 6895.9 * 124 = 855090\text{kcal/h}$$

$$\text{Entalpía del vapor } h_{(3)} = 668 \Rightarrow F_{(3)} \cdot h_{(3)} = (3900.9-2000)*668=1269800\text{kcal/h}$$

Entalpía del amoníaco del vapor: se considera despreciable al ser 5kg/h su caudal.

El término $F_{(3)} \cdot h_{(3)} + F_{(4)} \cdot h_{(4)} = 2124890\text{kcal/h}$. Realizamos una nueva iteración al no cuadrar el balance entálpico.

Suponemos $M_{(3),H_2O} = 1500\text{kg/h}$

$$\text{Concentración del licor } 4682/(1500 + 4682 + 213.56) = 0.732$$

Temperatura del licor (ver diagrama) $T_{(4)} = 160\text{C}$

$$\text{Entalpía del licor (ver diagrama) } h_{(4)} = 122\text{Kcal/kg} \Rightarrow F_{(4)} \cdot h_{(4)} = 6395.9 * 122 = 780300\text{kcal/h}$$

$$\text{Entalpía del vapor } h_{(3)} = 669 \Rightarrow F_{(3)} \cdot h_{(3)} = (3900.9-1500)*669=1606200\text{kcal/h}$$

Entalpía del amoníaco del vapor: se considera despreciable al ser 5kg/h su caudal.

El término $F_{(3)} \cdot h_{(3)} + F_{(4)} \cdot h_{(4)} = 2386500\text{kcal/h}$. El resultado cierra el balance con suficiente aproximación. Fin de la iteración.

La siguiente tabla muestra las corrientes:

	Corr.	①	Corr.	②	Corr.	③	Corr.	④
	kg/h	%p	kg/h.	%p	kg/h.	%p	kg/h.	%p
HNO ₃	3900.9	50	0	0	0	0	213.56	3.34
NH ₃	0	0	1000	100	5	0.21	0	0
H ₂ O	3900.9	50	0	0	2400.9	99.79	1500	23.45
N.A.	0	0	0	0	0	0	4682.4	73.21
TOTAL	7801.9	100	1000	100	2405.9	100	6395.9	100
Temperatura		140°C		25°C		160°C		160°C

Solución a la Pregunta 2

Base de cálculo 1000kmol/h de amoníaco. La cantidad de ácido nítrico que puede reaccionar con el amoníaco es el 99.5% en el primer reactor más el 80% de lo no reaccionado que se recicla al segundo reactor. Luego los moles de ácido nítrico que se pueden neutralizar en total son:

$$\eta * F_{(2)} + 0.8(1 - \eta)F_{(2)} = 0.995 * 1000 + 0.8 * 0.005 * 1000 = 999\text{kmol/h}$$

Luego el ácido nítrico alimentado será 999kmol/h, y la relación amoníaco/ácido nítrico será 1000/999= 1/0.999.