

Cálculo de un múltiple efecto. En el diseño de un evaporador de múltiple efecto los resultados generalmente deseados son la cantidad de vapor de agua consumido, el área de la superficie de calentamiento que se requiere, las temperaturas aproximadas en los distintos efectos y la cantidad de vapor que abandona el último efecto. Lo mismo que en un evaporador de simple efecto, estos valores se obtienen a partir de balances de materia, balances de entalpía y la ecuación de capacidad (16.1). Sin embargo, en un evaporador de múltiple efecto se utiliza un método de tanteo en vez de una solución algebraica directa.

Consideremos, por ejemplo, un evaporador de triple efecto. Se pueden escribir siete ecuaciones: un balance de entalpía para cada efecto, una ecuación de capacidad para cada efecto y la evaporación total, que es conocida, o bien la diferencia entre los flujos de las disoluciones concentrada y diluida. Si se supone que la superficie de calentamiento en cada efecto es la misma, hay siete incógnitas en estas ecuaciones: (1) el flujo de vapor vivo que entra en el primer efecto, (2) a (4) la velocidad de flujo desde cada efecto, (5) la temperatura de ebullición en el primer efecto, (6) la temperatura de ebullición en el segundo efecto, y (7) la superficie de calefacción por efecto. Es posible obtener las siete incógnitas a partir de estas ecuaciones, pero el método resulta tedioso. Otro método de cálculo es el siguiente:

1. Se suponen temperaturas de ebullición en el primer y segundo efectos.
2. A partir de balances de entalpía se obtienen las velocidades de flujo de vapor de agua y de disolución de un efecto a otro.
3. Se calcula la superficie de calefacción que se requiere en cada efecto a partir de las ecuaciones de capacidad.
4. Si las áreas de calefacción así encontradas no son aproximadamente iguales, se estiman nuevos valores para las temperaturas de ebullición y se repiten las partes 2 y 3 hasta que las superficies de calefacción sean iguales.

En la práctica estos cálculos se realizan con un ordenador digital.

Ejemplo 16.3. Un evaporador de triple efecto de circulación forzada ha de alimentarse con 60 000 lb/h (27 215 kg/h) de una disolución de sosa cáustica al 10 por 100 a una temperatura de 180 °F (82,2 QC). La disolución concentrada contendrá un 50 por 100 de NaOH. Se utilizará vapor de agua saturado a 50 lb_f/pulg² (3,43 atm abs) absolutas, y la temperatura del vapor procedente del tercer efecto será de 100 °F (37,8 °C). El orden de los efectos es II, III, I. Pueden despreciarse la radiación y el subenfriamiento del condensado. Los coeficientes globales corregidos para tener en cuenta la elevación del punto de ebullición se dan en la Tabla 16.2. Calcúlese (a) la superficie de calefacción que se requiere en cada efecto, suponiendo que son iguales en todos ellos, (b) el consumo de vapor y (c) la economía de vapor.

SOLUCIÓN

La velocidad total de evaporación puede calcularse a partir de un balance global de materia, suponiendo que los sólidos pasan sin pérdidas a través del evaporador (Tabla 16.3).

La Figura 16.12 presenta un diagrama de flujo de este evaporador. Los efectos primero, segundo y tercero se representan por I, II y III, respectivamente. Para los balances de materia y calor, tómesese

\dot{m}_s = flujo de vapor de agua

T_1, T_2, T_3 = temperaturas de ebullición en I, II y III

q_1, q_2, q_3 = velocidades de transmisión de calor en I, II y III

C_1, C_2, C_3 = concentraciones como fracciones en peso de sólidos disueltos en las disoluciones I, II y III

T'_1, T'_2, T'_3 = temperatura de condensación del vapor procedente de I, II y III

Tabla 16.2 .

| Efecto | Coeficiente global | |
|--------|----------------------------|----------------------|
| | Btu/pie ² -h-°F | W/m ² -°C |
| I | 700 | 3970 |
| II | 1000 | 5680 |
| III | 800 | 4540 |

Tabla 16.3

| Material | Velocidad de flujo, lb/h | | |
|----------------------------|--------------------------|--------|-------|
| | Total | Sólido | Agua |
| Disolución de alimentación | 60000 | 6000 | 54000 |
| Disolución concentrada | 12000 | 6000 | 6000 |
| Agua evaporada | 48000 | | 48000 |

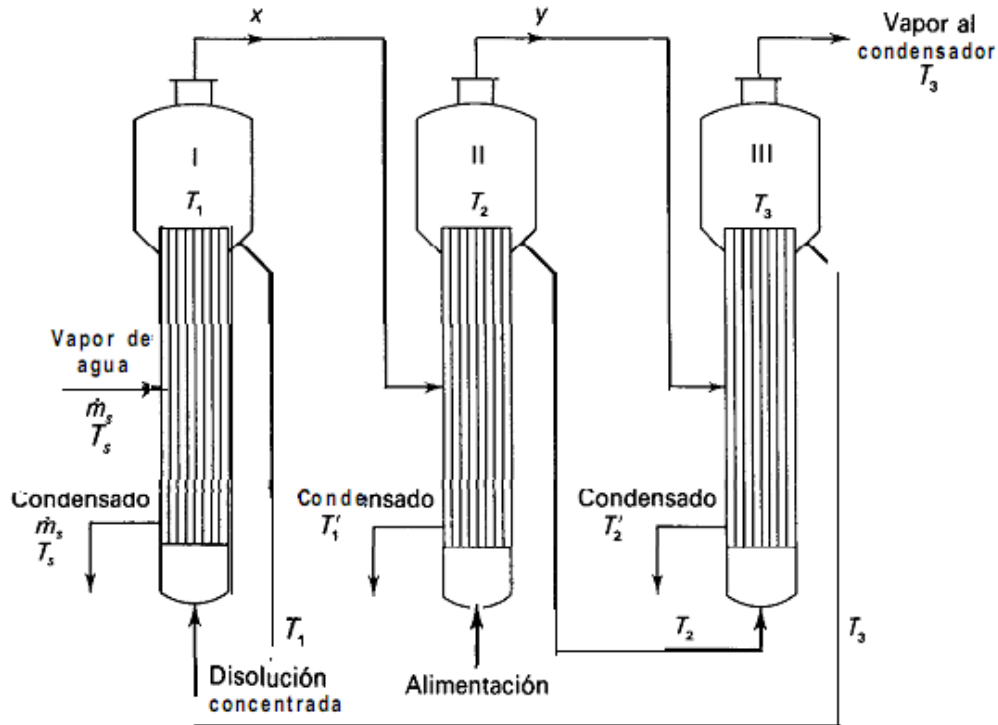


Figura 16.12. Diagrama de flujo para el Ejemplo 16.3.

Para estimar las concentraciones y , por tanto, las elevaciones del punto de ebullición, supóngase primeramente, iguales velocidades de evaporación en cada efecto, o sea $48\ 000/3 = 16\ 000\ \text{lb/h}$. Las concentraciones intermedias son entonces

$$C_2 = \frac{6000}{60000 - 16000} = 0,136 \quad C_3 = \frac{6000}{60000 - 32000} = 0,214$$

Las elevaciones estimadas, a partir de la Figura 16.4, del punto de ebullición son

| Efecto | I | II | III |
|------------------------|----|----|-----|
| Elevación del p.e., °F | 76 | 7 | 13 |

Como guía en un primer intento de distribuir la caída de temperatura a través de los tres efectos, resultan valiosos los siguientes criterios. Tal como se ha visto en la página 505, la caída de temperatura en cada efecto es inversamente proporcional al coeficiente global de transmisión de calor. Por otra parte, un efecto que tiene una carga extra requiere una mayor proporción de la caída total de temperatura que los demás efectos. En este problema la temperatura del vapor de agua, de acuerdo con el Apéndice B, es $281\ ^\circ\text{F}$. La caída total de temperatura es $281 - 100 = 181\ ^\circ\text{F}$, pero la caída neta de temperatura es solamente $181 - (76 + 7 + 13) = 85\ ^\circ\text{F}$. Esta es la caída disponible para la distribución. La caída de temperatura en el segundo efecto será menor debido al elevado coeficiente y a la que la alimentación está caliente; la caída de temperatura en el primer efecto será ligeramente mayor que en el tercer efecto debido

a la diferencia de los coeficientes. A partir de estas consideraciones la primera suposición es

$$\Delta T_1 = 33 \text{ } ^\circ\text{F} \quad \Delta T_2 = 23 \text{ } ^\circ\text{F} \quad \Delta T_3 = 29 \text{ } ^\circ\text{F}$$

La temperatura de la disolución en I (igual a la temperatura del vapor sobrecalentado procedente de ella) es

$$T_1 = 281 - 33 = 248 \text{ } ^\circ\text{F}$$

La temperatura de saturación de este vapor es $T_1' = 248 - 76 = 172 \text{ } ^\circ\text{F}$. De la misma forma.

$$\begin{aligned} T_2 &= 172 - 23 = 149 \text{ } ^\circ\text{F} & T_2' &= 149 - 7 = 142 \text{ } ^\circ\text{F} \\ T_3 &= 142 - 29 = 113 \text{ } ^\circ\text{F} & T_3' &= 113 - 13 = 100 \text{ } ^\circ\text{F} \end{aligned}$$

Tabla 16.4. Temperaturas, entalpías y velocidades de flujo para el Ejemplo 16.3

| Corriente | Temp., °F | Temperatura de saturación, °F | Concentración, fracción en peso | Entalpía, Btu/lb | Velocidad de flujo, lb/h |
|-------------------|--------------|----------------------------------|------------------------------------|---------------------|-----------------------------|
| Vapor de agua | 281 | 281 | | 1174 | m_s |
| Alimentación a I | 113 | | 0,214 | 67 | $12\,000 + x$ |
| Vapor de I | 248 | 172 | | 1171 | x |
| Condensado de I | 281 | | | 249 | m_s |
| Líquido de I | 248 | | 0,50 | 250 | 12 000 |
| Alimentación a II | 180 | | 0,10 | 135 | 60 000 |
| Vapor de II | 149 | 142 | | 1126 | y |
| Líquido de II | 149 | | 0,136 | 102 | $60\,000 - y$ |
| Condensado de II | 172 | | | 140 | x |
| Vapor de III | 113 | 100 | | 1111 | $48\,000 - x - y$ |
| Condensado de III | 142 | | | 110 | y |

Las entalpías de las distintas corrientes pueden estimarse ahora a partir de la Figura 16.8 para las disoluciones y del Apéndice 8 para el vapor de agua saturado. La entalpía del vapor sobrecalentado puede estimarse a partir del vapor de agua, o bien corrigiendo la entalpía de saturación suponiendo un calor específico para el vapor de $0,47 \text{ Btu/lb}\cdot^\circ\text{F}$. El «vapor» procedente de un efecto constituye el vapor de agua del efecto siguiente. Pueden aplicarse ahora balances de entalpía para calcular la superficie requerida. Sea x la verdadera velocidad de evaporación en I, y en II, y $48\,000 - (x + y)$ en III. En la Tabla 16.4 se dan las temperaturas, entalpías y velocidades de flujo.

Los balances de entalpía son:

Para II:

$$\begin{aligned} 1171x + (60\,000)(135) &= 1126y + 102(60\,000 - y) + 140x \\ x &= 0,993y = -46\,000 \end{aligned}$$

Para III:

$$1126y + (102)(60\,000 - y) = 1111(48\,000 - x - y) + (12\,000 + x)67 + 110y$$
$$x + 1,940y = 46\,000$$

Por otra parte,

$$\frac{x - 0,993y = -1920}{2,933y = 47\,920}$$
$$y = 16\,340 \text{ lb/h}$$
$$x = 14\,300 \text{ lb/h}$$

La velocidad de evaporación en III es

$$48\,000 - 14\,300 - 16\,340 = 17\,360 \text{ lb/h}$$

Cargas de calor:

$$q_1 = (14\,300)(1171) + (250)(12\,000) - (67)(12\,000 + 14\,300) = 17\,983\,000 \text{ Btu/h}$$

$$q_2 = (14\,300)(1171 - 140) = 14\,743\,000 \text{ Btu/h}$$

$$q_3 = (16\,340)(1126 - 110) = 16\,601\,000 \text{ Btu/h}$$

Por tanto, las áreas son

$$A_1 = \frac{17\,983\,000}{700 \times 33} = 778 \text{ pie}^2$$

$$A_2 = \frac{17\,743\,000}{100 \times 23} = 640 \text{ pie}^2$$

$$A_3 = \frac{16\,601\,000}{29 \times 800} = 720 \text{ pie}^2$$

$$\text{Area media} = 712 \text{ pie}^2$$

Puesto que las superficies no son iguales, como es necesario, las concentraciones, caídas de temperatura y entalpías se corrigen convenientemente y se recalculan las velocidades de evaporación, las cargas de calor y las superficies de la transmisión de calor hasta que éstas sean suficientemente próximas entre sí. Los resultados de estos cálculos se presentan en la Tabla 16.5.

Las respuestas al problema son:

(a) *Area de cada efecto*

$$719 \text{ pie}^2 (675 \text{ m}^2)$$

(b) *Consumo de vapor de agua*

$$m_s = \frac{17\,920\,000}{1174 - 249} = 19\,370 \text{ lb/h (8786 kg/h)}$$

Tabla 16.5. Temperaturas, entalpías y velocidades de flujo para el Ejemplo 16.3

| Corriente | Temp., °F | Temperatura de saturación, °F | Concentración, fracción en peso | Entalpía, Btu/lb | Velocidad de flujo, lb/h |
|-------------------|-----------|-------------------------------|---------------------------------|------------------|--------------------------|
| Vapor de agua | 281 | 281 | | 1174 | m_s |
| Alimentación a I | 113 | | 0,228 | 68 | $12\,000 + x$ |
| Vapor de I | 245 | 170 | | 1170 | x |
| Condensado de I | 281 | | | 249 | m_s |
| Líquido de I | 246 | | 0,50 | 249 | 12 000 |
| Alimentación a II | 180 | | 0,10 | 135 | 60 000 |
| Vapor de II | 149 | 142 | | 1126 | Y |
| Líquido de II | 149 | | 0,137 | 101 | $60\,000 - y$ |
| Condensado de II | 170 | | | 138 | x |
| Vapor de III | 114 | 100 | | 1111 | $48\,000 - x - y$ |
| Condensado de III | 142 | | | 110 | Y |

(c) Economía

$$\frac{48\,000}{19\,370} = 2,48$$

Fuente: McCabe – Smith “Operaciones unitarias en ingeniería química”, cuarta edición, pp. 510 – 515.