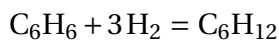


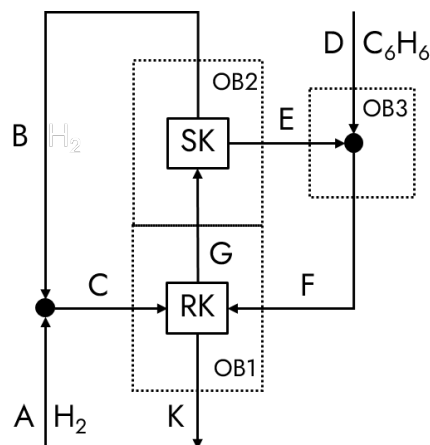
Wytwarzanie cykloheksanu przez uwodornienie benzenu

Cykloheksan wytwarza się przez uwodornienie benzenu w reakcji:



Proces prowadzi się w obecności katalizatora w temperaturze 200-220°C pod ciśnieniem około 2,5 MPa. Uproszczony schemat instalacji produkcyjnej przedstawiono na rys.1. Reaktor przepływowy **RK** działający w trybie ciągłym jest wypełniony cieczą mieszaniną benzenu i cykloheksanu, przez którą przepływa wodór. Strumień wodoru **C** wprowadza się do reaktora w nadmiarze w stosunku do ilości stechiometrycznej. Stosunek molowy strumieni wodoru i benzenu wprowadzanych do reaktora jest większy od 3. W takich warunkach reakcja przebiega praktycznie nieodwracalnie. Wodór, który nie przereagował w reaktorze **RK**, jest odprowadzany z nadwarstwy cieczy w strumieniu

G. Strumień **G** oprócz wodoru zawiera parę benzenu. Po ochłodzeniu gazów w skraplaczu **SK** skroplony benzen oddziela się (strumień **E**) i łączy się go ze strumieniem benzenu **D** doprowadzanego do instalacji. Połączony strumień benzenu **F** jest wprowadzany do reaktora **RK**. Strumień wodoru **B** odprowadzany ze skraplacza **SK** łączy się ze strumieniem wodoru **A**, który doprowadza się do instalacji. Połączony strumień wodoru **C** jest wprowadzany do reaktora **RK**. W tak zorganizowanym układzie występują dwa obiegi powrotne, benzenu i wodoru. Oba te reagenty przed rozdzieleniem znajdują się w strumieniu **G**, który jest kierowany z reaktora **RK** do skraplacza **SK**.



Rysunek 1: Uproszczony schemat instalacji do uwodornienia benzenu do cykloheksanu

Stosowane wielkości

- Natężenia przepływu W w jednostkach [kmol/h].
- Stosunek natężenia przepływu benzenu i wodoru występujących w strumieniu **G**:

$$b = \frac{W_G[\text{C}_6\text{H}_6]}{W_G[\text{H}_2]}$$

- Stopień przemiany benzenu:

$$x = \frac{W_F[C_6H_6] - W_G[C_6H_6]}{W_F[C_6H_6]}$$

- Stopień przemiany wodoru:

$$h = \frac{W_C[H_2] - W_G[H_2]}{W_C[H_2]}$$

- Stosunek natężenia przepływu strumieni H_2 **C** i C_6H_6 **F** wprowadzanych do reaktora **RK**:

$$n = \frac{W_C[H_2]}{W_F[C_6H_6]}$$

Zadanie 1: Zależność między stopniem przemiany H_2 (h) i stopniem przemiany C_6H_6 (x)

Założenia

1. Proces jest ciągły i zachodzi w warunkach stacjonarnych.
2. Benzen wprowadzany do instalacji w strumieniu **D** zostaje przetworzony w cykloheksan bez strat, czyli z wydajnością materiałową równą 1.
3. Cała ilość wytworzonego cykloheksanu jest odprowadzana z instalacji w strumieniu **K**, przy czym zgodnie z równaniem stechiometrycznym i założeniem 2: $W_K[C_6H_{12}] = W_D[C_6H_6]$.
4. Wodór wprowadzany do instalacji w strumieniu **A** zostaje zużyty bez strat w reakcji uwodornienia benzenu.
5. W strumieniu **C** wprowadza się do reaktora **RK** nadmiar wodoru w stosunku do ilości stechiometrycznej wynikającej z równania reakcji i wielkości strumienia benzenu **D**.
6. Cała ilość nadmiarowego wodoru odprowadzana z reaktora **RK** w strumieniu **G**, po skropleniu i oddzieleniu benzenu, jest kierowana ponownie do reaktora **RK** w strumieniu **B**, który łączy się ze strumieniem **A**. Cała ilość benzenu, który w postaci pary znajduje się w strumieniu **G**, zostaje skroplona w skraplaczu **SK** i skierowana ponownie do reaktora **RK** w strumieniu **F**, który łączy się ze strumieniem benzenu **D**.

Cel zadania:

Należy wyznaczyć zależność $x = x(b, h)$

Rozwiązanie:

Podstawa bilansu: $W_K[C_6H_{12}] = 100 \text{ kmol/h}$

Z równania stechiometrycznego reakcji uwodorniania benzenu i założeń 1-7 wynika, że:

$$W_D[C_6H_6] = 100 \text{ kmol/h}$$

$$W_A[H_2] = 300 \text{ kmol/h}$$

Z bilansu reaktora **RK (OB1)** przy uwzględnieniu równania stechiometrycznego reakcji wynika, że:

$$W_F[C_6H_6] - W_G[C_6H_6] = W_K[C_6H_{12}] = 100 \text{ kmol/h}$$

Na podstawie definicji stopnia przemiany benzenu x przez podstawienie powyższego wyniku otrzymuje się:

$$x = \frac{100}{W_F[C_6H_6]}$$

Z bilansu skraplacza **SK (OB2)** i węzła łączącego strumienie **D** i **E** wynika, że

$$\begin{aligned} W_G[C_6H_6] &= W_E[C_6H_6] = W_F[C_6H_6] - 100 \\ W_G[C_6H_6] &= 100 \left(\frac{1}{x} - 1 \right) \end{aligned} \quad (1)$$

Z bilansu reaktora **RK (OB1)** i równania stechiometrycznego reakcji wynika, że

$$\begin{aligned} W_C[H_2] &= W_G[H_2] + 300 \\ W_C[H_2] - W_G[H_2] &= 300 \end{aligned}$$

Na podstawie definicji stopnia przemiany wodoru h przez podstawienie powyższego wyniku otrzymuje się

$$h = \frac{300}{W_C[H_2]}$$

czyli

$$W_C[H_2] = 300 \cdot \frac{1}{h} \quad (2)$$

co daje

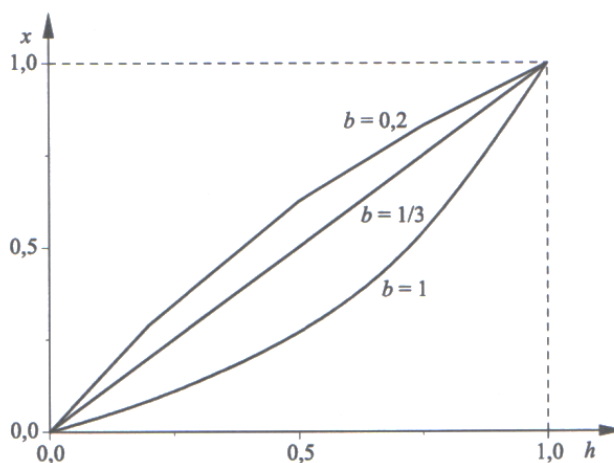
$$W_G[H_2] = W_C[H_2] - 300 = 300 \cdot \left(\frac{1}{h} - 1 \right) \quad (3)$$

Zgodnie z definicją wielkości b :

$$W_G[C_6H_6] = b \cdot W_G[H_2] \quad (4)$$

Z równań (1), (3) i (4) otrzymuje się następującą zależność:

$$100 \left(\frac{1}{x} - 1 \right) = 300 \cdot b \cdot \left(\frac{1}{h} - 1 \right)$$



Rysunek 2: Zależność $x = x(b, h)$: x -stopień przemiany benzenu, h - stopień przemiany wodoru, $b = W_G[C_6H_6]/W_G[H_2]$

Która rozwiązując względem x pozwala na otrzymanie wyniku:

$$x = \frac{h}{h + 3b - 3h \cdot b}$$

Wyznaczoną zależność $x = x(b, h)$ przedstawiono w formie graficznej:

Zadanie 2: Stosunek strumieni wodoru i benzenu wprowadzanych do reaktora

Cel zadania: Należy wyznaczyć zależność $n = n(b, h)$

Rozwiązanie:

Na podstawie definicji zmiennej b oraz równania (3) można obliczyć strumień benzenu w mieszaninie reagentów **G**:

$$W_G[C_6H_6] = b \cdot W_G[H_2] = 300 \cdot b \cdot \left(\frac{1}{h} - 1\right) \quad (5)$$

Ponieważ:

$$W_G[C_6H_6] = W_E[C_6H_6]$$

z bilansu węzła łączącego strumienie **E** i **D** (**OB3**) wynika, że:

$$W_F[C_6H_6] = W_E[C_6H_6] + 100 = W_G[C_6H_6] + 100$$

Przez podstawienie prawej strony równania (5) zamiast $W_G[C_6H_6]$ otrzymuje się:

$$W_F[C_6H_6] = 300 \cdot b \cdot \left(\frac{1}{h} - 1\right) + 100 \quad (6)$$

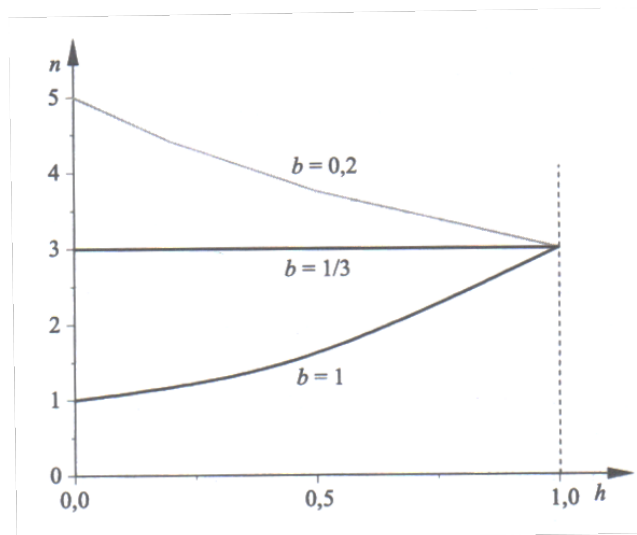
Ponieważ zgodnie z definicją

$$n = \frac{W_C[H_2]}{W_F[C_6H_6]}$$

przez zastosowanie równań (2) i (6) otrzymuje się wynik:

$$n = \frac{3}{h + 3b - 3h \cdot b}$$

Wyznaczoną zależność $n = n(b, h)$ przedstawiono na rysunku poniżej.



Rysunek 3: Zależność $n = n(b, h)$: $n = W_C[H_2]/W_F[C_6H_6]$ h - stopień przemiany wodoru, $b = W_G[C_6H_6]/W_G[H_2]$

Omówienie wyników:

Z zależności $x = x(b, h)$ wyznaczonej w zadaniu 1 wynika, że stopień przemiany benzenu x w reaktorze **RK** jest związany ze stopniem przemiany wodoru h (rys. 2). Przy niewielkiej wartości h znaczna część strumieni benzenu i wodoru, które doprowadza się do reaktora, opuszcza reaktor w strumieniu **G**. Natężenie strumienia benzenu odprowadzanego z reaktora jest związane z natężeniem strumienia wodoru opuszczającego reaktor w strumieniu **G**. Związek między strumieniami tych reagentów określa wartość stosunku molowego b par benzenu do wodoru. Oba nieprzetworzone reagenty, opuszczające reaktor **RK** w strumieniu **G**, są rozdzielane na dwa strumienie w skraplaczu **SK** i kierowane ponownie do reaktora. Im większą wartość stopnia przemiany benzenu i wodoru uzyskuje się w reaktorze, tym mniejsze są powrotne strumienie reagentów. Przy określonej wartości stopnia przemiany wodoru h strumień benzenu odprowadzany z reaktora jest tym większy, im większa jest wartość zmiennej b . Z tego powodu ze wzrostem b maleje stopień przemiany benzenu x . Zależność $n = n(b, h)$ (rys. 3) wyznaczona w zadaniu 2 przedstawia wpływ stopnia przemiany wodoru h na stosunek molowy n strumieni reagentów wprowadzonych do reaktora **RK** czyli stosunek strumienia wodoru **C** do strumienia benzenu **F**. Na tę zależność znaczny wpływ ma stosunek molowy b benzenu i wodoru w strumieniu **G**. Im większa jest wartość b , tym

więcej benzenu znajduje się w strumieniu **G**. Z tego powodu wzrasta strumień **F** benzenu powracającego do reaktora **RK**, a przy określonej wartości stopnia przemiany wodoru h zmniejsza się n , czyli stosunek strumienia wodoru **C** do strumienia benzenu **F**.