

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«Харківський політехнічний інститут»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до розрахункового завдання

**“Обґрунтування вибору енергоефективних витрат сировини
в хімічній технології”**

з дисциплін

“Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів”

для студентів спеціальності 6.05130101

“Хімічні технології неорганічних речовин”

денної та заочної форм навчання і

«Контроль та керування хіміко-технологічними процесами»

для студентів спеціальності 6.05020201

«Автоматизоване управління технологічними процесами»

денної та заочної форм навчання

Затверджено

редакційно-видавничою

радою університету,

протокол № 2 від 07.12.2011 р.

Харків
НТУ „ХПІ”
2012

Методичні вказівки до розрахункового завдання “Обґрунтування вибору енергоефективних витрат сировини в хімічній технології” з дисципліни “Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів” і “Контроль та керування хіміко-технологічними процесами” для студентів спеціальності 6.05130101 “Хімічні технології неорганічних речовин” денної та заочної форм навчання та 6.05020201 “Автоматизоване управління технологічними процесами” денної та заочної форм навчання / Уклад.: Д.М. Дейнека, А.С. Савенков, В.О. Лобойко, В.В. Дейнека. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2012. – 32 с.

Укладачі: Д.М. Дейнека
А.С. Савенков
В.О. Лобойко
В.В. Дейнека

Рецензент В.І. Булавін

Кафедра хімічної технології неорганічних речовин, каталізу та екології

ВСТУП

Зменшення споживання паливно-енергетичних ресурсів у хімічній промисловості пов'язано з широкомасштабною реалізацією енергозберігаючої техніки і технології, утворенням енерготехнологічних комплексів. Успішне рішення пріоритетного завдання енергозбереження потребує, в свою чергу, відповідної компетенції в інженерів-технологів усіх спеціальностей.

Курси “Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів” і “Контроль та керування хіміко-технологічними процесами” посідають важливе місце в професійній підготовці студентів за спеціальностями “Хімічна технологія неорганічних речовин”, “Автоматизоване управління технологічними процесами”, та базуються на загальнотеоретичних, загальнотехнічних і спеціальних дисциплінах, що вивчаються студентами у вищому технічному закладі. Основним завданням цих курсів є формування у майбутніх спеціалістів знань і умінь у галузі генерування тепла в технологічних об'єктах, енерготехнологічного комбінування вторинних енергоресурсів, оцінки енергетичної ефективності процесів, скорочення теплових викидів у навколишнє середовище, а також знайомство студентів хімічних спеціальностей з приладами та засобами автоматизації, методами контролю та керування станом технологічних процесів.

У цих методичних вказівках наведено методичку пошуку найбільш ефективного способу отримання готового продукту з різної сировини з точки зору енергоємності. Вони призначені для використання на практичних заняттях та при виконанні розрахункового завдання з курсів “Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів” та “Контроль та керування хіміко-технологічними процесами”. Головною метою є поглиблення і засвоєння студентами теоретичних знань, набутих у лекційному курсі, а також оволодіння методиками пошуку шляхів зменшення втрат енергії у хімічній технології.

1. ОСНОВНІ ЗАКОНИ ТА РІВНЯННЯ

Хімічне виробництво характеризується високою енергоємністю й для пошуку шляхів зменшення втрат енергії необхідно проводити термодинамічний аналіз. Для опису хіміко-технологічного процесу використовується рівняння матеріального й енергетичного балансів.

1.1. Закон збереження маси

Маса речовини, що вступила у хімічну реакцію, дорівнює масі речовини, що утворилася у результаті протікання реакції.

$$\sum_{i=1}^n G_i^{\text{вд}} = \sum_{i=1}^n G_i^{\text{вп}}, \quad (1.1)$$

де $\sum_{i=1}^n G_i^{\text{вд}}$, $\sum_{i=1}^n G_i^{\text{вп}}$ – сумарна кількість речовин, що вступила в хімічну реакцію, та сумарна кількість продуктів, що утворилася у результаті протікання реакцій, відповідно, кг:

$$G_i^{\text{вд}} = \frac{G_i^{\text{вп}} \cdot \nu_i^{\text{вд}} \cdot M_i^{\text{вд}}}{\nu_i^{\text{вп}} \cdot M_i^{\text{вп}} \cdot \alpha}; \quad (1.2)$$

$$G_i^{\text{вп}} = \frac{G_i^{\text{вд}} \cdot \nu_i^{\text{вп}} \cdot M_i^{\text{вп}} \cdot \alpha}{M_i^{\text{вд}} \cdot \nu_i^{\text{вд}}}, \quad (1.3)$$

де $\nu_i^{\text{вд}}$, $\nu_i^{\text{вп}}$ – стехіометричний коефіцієнт рівняння хімічної реакції i -го компонента для вихідної сировини та продуктів реакції, відповідно; $M_i^{\text{вд}}$, $M_i^{\text{вп}}$ – молекулярна маса i -го реагенту вихідної сировини та продукта реакції, відповідно, г/моль або кг/кмоль; α – ступінь перетворення вихідної сировини, д.о.

Для переведення масових одиниць в об'ємні і навпаки використовують такі формули:

- для газів при нормальних умовах ($P = 101325$ Па, $T = 273,15$ К):

$$V_i = \frac{G_i \cdot V_A}{M_i}; \quad G_i = \frac{V_i \cdot M_i}{V_A},$$

- для рідин та твердих речовин:

$$V_i = \frac{G_i}{\rho_i}; \quad G_i = V_i \cdot \rho_i,$$

де V_i – об’єм речовини, м³; G_i – маса речовини, кг; V_A – молярний об’єм газу при нормальних умовах, $V_A = 22,4$ л/моль або м³/кмоль; ρ_i – щільність речовини, г/см³ або кг/м³ [1].

1.2. Енергія Гіббса і напрямок протікання реакції

Характер зміни енергії Гіббса ΔG дозволяє судити про принципову ймовірність здійснення процесу (тобто, якщо енергія Гіббса у вихідному стані системи більше, ніж у кінцевому, то процес принципово може протікати, якщо навпаки – то ні):

$\Delta G < 0$ – процес може протікати;

$\Delta G > 0$ – процес протікати не може;

$\Delta G = 0$ – система знаходиться у стані хімічної рівноваги.

Для визначення температури, при якій протікання реакції найбільш ймовірно, знаходять залежність енергії Гіббса від температури $\Delta G = f(T)$. Значення температур, при яких $\Delta G < 0$, буде відповідати значенням температур можливого перебігу процесу [2, 3].

Енергія Гіббса розраховується за рівнянням Гіббса – Гельмгольца, Дж/моль:

$$\Delta G^T = \Delta H^T - T \cdot \Delta S^T, \quad (1.4)$$

де ΔH^T – зміна ентальпії реакції при температурі T , Дж/моль;
 ΔS^T – зміна ентропії реакції при температурі T , Дж/(моль · град);
 T – температура реакції, К.

Розрахунок змін ентальпії ΔH^T та ентропії ΔS^T реакції при температурі T проводиться за такими формулами:

$$\Delta H^T = \Delta H^{298} + \Delta a \cdot (T - 298) + \Delta b \cdot \frac{(T^2 - 298^2)}{2} + \Delta c' \cdot \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T} \right) +$$

$$+ \Delta c \cdot \frac{(T^3 - 298^3)}{3}; \quad (1.5)$$

$$\Delta S^T = S^{298} + \Delta a \cdot \ln\left(\frac{T}{298}\right) + \Delta b \cdot (T - 298) + \Delta c' \cdot \frac{\left(\frac{1}{298^2} - \frac{1}{T^2}\right)}{2} + \Delta c \cdot \frac{(T^2 - 298^2)}{2}, \quad (1.6)$$

де ΔH^{298} – стандартна ентальпія реакції при температурі 298 К, Дж/моль; ΔS^{298} – стандартна ентропія реакції при температурі 298 К, Дж/(моль · град); Δa , Δb , $\Delta c'$, Δc – коефіцієнти у поліномі $C_p = f(T)$ для цієї реакції (c – як правило, для органічних сполук, а c' – як правило, для неорганічних сполук):

$$\Delta C_p = \Delta a + \Delta b \cdot T + \Delta c' \cdot \frac{1}{T^2} + \Delta c \cdot T^2, \quad (1.7)$$

де ΔC_p – теплоємність речовини при постійному тиску, Дж/(моль · град).

1.3. Закон збереження енергії

Енергія передається у вигляді роботи та у вигляді теплоти, але форма передачі різна. Робота – це енергія в організованій формі, а теплота – у хаотичній. Закон збереження енергії стверджує, що енергія не зникає й не виникає, а переходить з однієї форми в іншу. Зменшення одного виду енергії дає еквівалентне збільшення іншого:

$$\sum_{i=1}^n I_{i\delta} = \sum_{i=1}^n I_{\dot{a}\delta}, \quad (1.8)$$

де $\sum_{i=1}^n I_{i\delta}$, $\sum_{i=1}^n I_{\dot{a}\delta}$ – сумарний ентальпійний потік на вході у реактор та на виході, відповідно, Дж:

$$\sum_{i=1}^n I_{i\delta} = \sum_{i=1}^n (G_i^{\dot{i}\delta} \cdot H_i^{\dot{i}\delta}); \quad (1.9)$$

$$\sum_{i=1}^n I_i^{\hat{\Delta}} = \sum_{i=1}^n (G_i^{\hat{\Delta}} \cdot H_i^{\hat{\Delta}}), \quad (1.10)$$

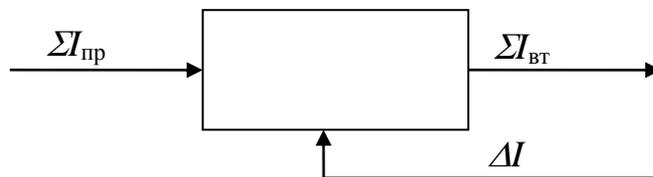
де $H_i^{\hat{\Delta}}$, $H_i^{\hat{\Delta}}$ – ентальпія i -ої речовини на вході та на виході з реактору, відповідно, визначається для реальної температури процесу T за формулою (1.5).

Використовуючи результати розрахунку матеріального балансу та розрахунку ентальпії для кожної речовини, визначається ентальпійний потік за рівняннями (1.9) і (1.10). Визначається сума всіх ентальпійних потоків на вході й на виході. Після цього проводиться порівняння суми всіх потоків і визначається ентальпійний дебаланс:

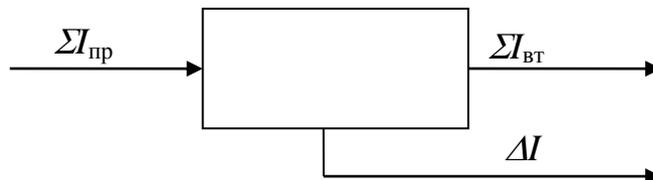
$$\Delta I = \sum_{i=1}^n I_i^{\hat{\Delta}} - \sum_{i=1}^n I_i^{\hat{\Delta}}. \quad (1.11)$$

Після чого проводиться аналіз отриманих результатів:

1) якщо потік на виході більше, ніж на вході ($I > 0$), то для стійкого протікання процесу необхідно підвести енергію



2) якщо ($I < 0$), тобто ентальпійний потік на виході менше, ніж ентальпійний потік на вході, тому для стійкого протікання процесу необхідно відвести певну кількість енергії



Загальний висновок: краще коли енергія виводиться із системи, наприклад, за допомогою газових турбін, теплових насосів, компресорів і т.д. Але для остаточного висновку про доцільність вибору того або ін-

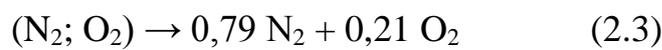
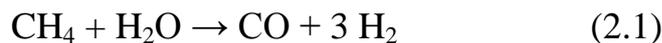
шого способу виробництва готового продукту поряд з термодинамічним аналізом необхідно провести техніко-економічну оцінку.

2. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ РЕАКЦІЇ СИНТЕЗУ АМІАКУ

Аміак є одним із важливих продуктів, що виробляється багатотоннажною хімічною промисловістю у теперішній час. Його використовують для отримання різноманітного асортименту продукції хімічної промисловості, тому спосіб його виробництва, вихідна сировина та енерговитрати на цю технологію будуть важливим фактором у формуванні собівартості готової продукції та її конкурентоспроможності на світовому ринку [4].

Розглянемо три варіанти отримання аміаку з різної сировини та проведемо аналіз енергоємності запропонованих способів.

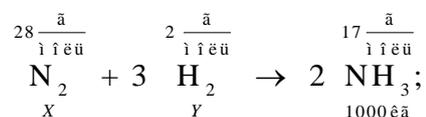
Варіант 1



Таким способом аміак отримують з водню, який є продуктом парової двохступеневої конверсії метану і СО, та азоту, одержаного в результаті розділення повітря при низьких температурах.

2.1. Розрахунок матеріального балансу

Проведемо розрахунок матеріального балансу на 1 т аміаку:



$$X = m(\text{N}_2) = \frac{Mr(\text{N}_2) \cdot m(\text{NH}_3)}{\nu(\text{NH}_3) \cdot Mr(\text{NH}_3)} = \frac{28 \cdot 1000}{2 \cdot 17} = 823,5 \text{ кг};$$

$$V(\text{N}_2) = \frac{m(\text{N}_2) \cdot 22,4}{Mr(\text{N}_2)} = \frac{823,5 \cdot 22,4}{28} = 658,8 \text{ м}^3;$$

$$Y = m(\text{H}_2) = \frac{\nu(\text{H}_2) \cdot Mr(\text{H}_2) \cdot m(\text{NH}_3)}{\nu(\text{NH}_3) \cdot Mr(\text{NH}_3)} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 1000}{2 \cdot 17} = 176,5 \text{ кг};$$

$$V(\text{H}_2) = \frac{m(\text{H}_2) \cdot 22,4}{Mr(\text{H}_2)} = \frac{176,5 \cdot 22,4}{2} = 1976,8 \text{ м}^3;$$

$$V(\text{NH}_3) = \frac{m(\text{NH}_3) \cdot 22,4}{Mr(\text{NH}_3)} = \frac{1000 \cdot 22,4}{17} = 1317,6 \text{ м}^3.$$

Аналогічний розрахунок проводимо для інших реакцій, отримані дані зводимо у таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати розрахунку матеріального балансу для першого варіанта отримання аміаку

№ з/п	Речовина	Прихід		Витрата	
		кг	м ³	кг	м ³
CH₄ + H₂O → CO + 3 H₂					
1	CH ₄	353	494	–	–
2	H ₂ O	397	494	–	–
3	CO	–	–	617,6	494,08
4	H ₂	–	–	132,4	1481,76
Разом		750	988	750	1975,84
CO + H₂O → CO₂ + H₂					
1	CO	617,6	494	–	–
2	H ₂ O	397	494	–	–
3	CO ₂	–	–	970,5	494
4	H ₂	–	–	44,1	494
Разом		1014,6	988	1014,6	988
(N₂; O₂) → 0,79 N₂ + 0,21 O₂					
1	Повітря (N ₂ ; O ₂)	1042,4	812	–	–
2	N ₂	–	–	823,5	658,8
3	O ₂	–	–	218,9	153,23
Разом		1042,4	812	1042,4	812
N₂ + 3 H₂ → 2 NH₃					
1	N ₂	823,5	658,8	–	–
2	H ₂	176,5	1976,8	–	–
3	NH ₃	–	–	1000	1317,6
Разом		1000	2635,6	1000	1317,6

$$S^{473} = -197,8 - 50,18 \cdot \ln\left(\frac{473}{298}\right) + 0,03619 \cdot (473 - 298) +$$

$$+ \frac{4,598 \cdot 10^5}{2} \cdot \left[\frac{1}{298^2} - \frac{1}{473^2} \right] = -213,1 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}};$$

$$\Delta G = \Delta H^{473} - 473 \cdot S^{473} = -98209,17 - 473 \cdot (-213,1) = 2681,73 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}.$$

Аналогічно проводимо розрахунок енергії Гіббса при інших п'яти температурах для цієї реакції і реакцій (2.1), (2.2). Результати розрахунків оформляємо у вигляді графіка залежності $\Delta G = f(T)$.

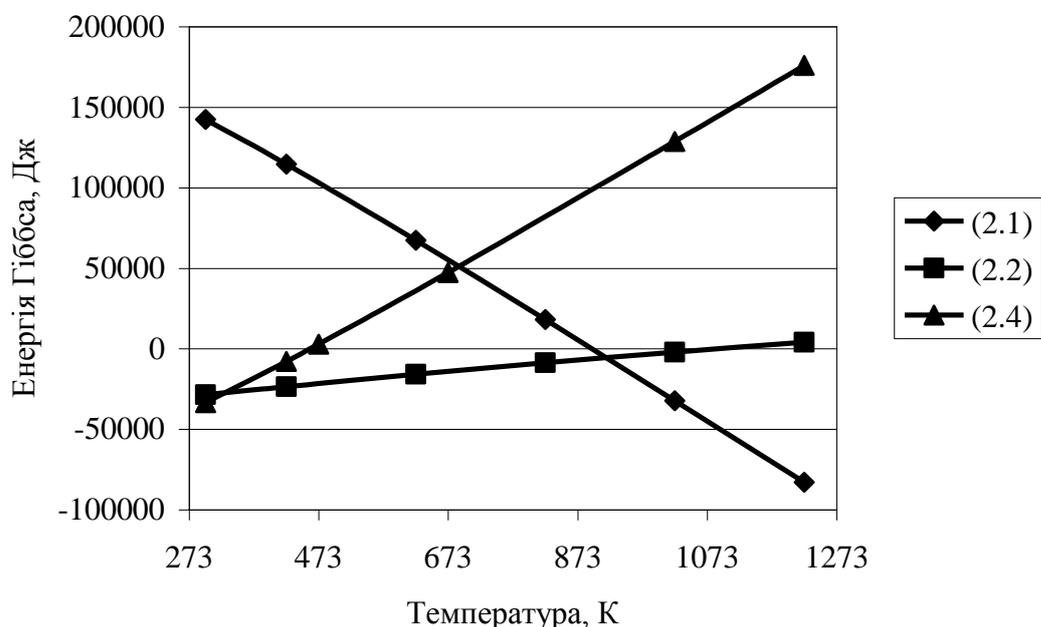


Рисунок 2.1 – Залежність енергії Гіббса від температури

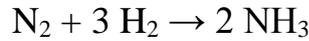
Аналізуючи дані графіка, обираємо температуру, при якій значення енергії Гіббса буде менше нульового значення. Слід пам'ятати, що від'ємне значення енергії Гіббса свідчить тільки про термодинамічну ймовірність протікання реакції при даній температурі.

Приймаємо для подальших розрахунків такі температури: $T_1 = 1023 \text{ К}$; $T_2 = 823 \text{ К}$; $T_4 = 423 \text{ К}$.

Реакція розділення повітря (2.3) не є хімічним процесом, що не дозволяє розрахувати енергію Гіббса та побудувати її залежність від температури, тому згідно з літературними даними [5], приймаємо температуру $T_3 = 123 \text{ К}$.

2.3. Розрахунок ентальпійного балансу

Розраховуємо ентальпію та ентальпійний потік по кожному компоненту для реакції (2.4) за рівняннями (1.9) та (1.10), використовуючи результати розрахунку матеріального балансу та температури процесу.



$$\Delta H_{\text{H}_2}^{423} = 0 + 27,28 \cdot (423 - 298) + \frac{1}{2} \cdot 0,00326 \cdot (423^2 - 298^2) +$$

$$+ 0,5 \cdot 10^5 \cdot \left[\frac{1}{298} - \frac{1}{423} \right] = 3606,5 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}};$$

$$I_{\text{H}_2}^{423} = \frac{G_{\text{H}_2} \cdot \Delta H_{\text{H}_2}^{423} \cdot 1000}{Mr(\text{H}_2)} = \frac{176,5 \cdot 3606,5 \cdot 1000}{2} = 318273625 \text{ Дж} = 0,32 \text{ ГДж};$$

$$\Delta H_{\text{N}_2}^{423} = 0 + 27,88 \cdot (423 - 298) + \frac{1}{2} \cdot 0,00427 \cdot (423^2 - 298^2) = 3677,4 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}};$$

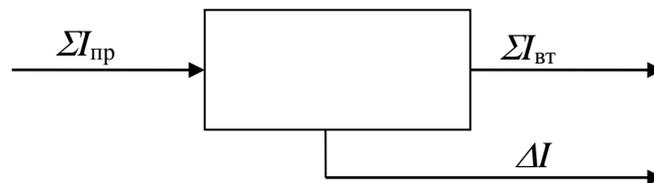
$$I_{\text{N}_2}^{423} = \frac{G_{\text{N}_2} \cdot \Delta H_{\text{N}_2}^{423} \cdot 1000}{Mr(\text{N}_2)} = \frac{823,5 \cdot 3677,4 \cdot 1000}{28} = 1514169450 \text{ Дж} = 1,51 \text{ ГДж};$$

$$\Delta H_{\text{NH}_3}^{423} = -46222 + 29,77 \cdot (423 - 298) + \frac{1}{2} \cdot 0,02512 \cdot (423^2 - 298^2) +$$

$$+ 1,55 \cdot 10^5 \cdot \left[\frac{1}{298} - \frac{1}{423} \right] = -41215,1 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}};$$

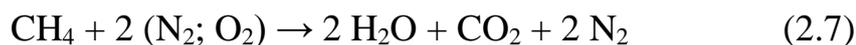
$$I_{\text{NH}_3}^{423} = \frac{G_{\text{NH}_3} \cdot \Delta H_{\text{NH}_3}^{423} \cdot 1000}{Mr(\text{NH}_3)} = \frac{1000 \cdot (-41215,1) \cdot 1000}{17} = -2,42 \text{ ГДж};$$

Аналогічно розраховуємо ентальпію та ентальпійний потік для реакцій (2.1) – (2.3). Отримані результати зводимо у таблицю 2.2. Дебаланс ΔI – негативний, тому для підтримки стійкого протікання процесу із системи необхідно відводити 18,468 ГДж енергії.



Варіант 2





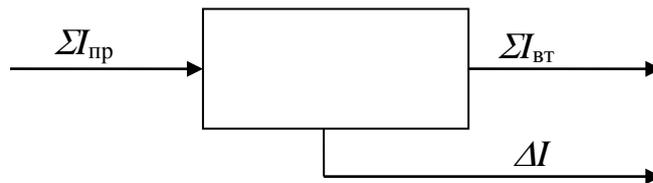
Таблиця 2.2 – Результати розрахунку ентальпійних потоків для першого варіанта отримання аміаку

№ з/п	Речовина	Прихід		Витрата	
		G, кг	I, ГДж	G, кг	I, ГДж
$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2, T_1 = 1023 \text{ K}$					
1	CH ₄	353	-0,88	-	-
2	H ₂ O	397	-4,74	-	-
3	CO	-	-	617,6	-1,94
4	H ₂	-	-	132,4	1,42
Разом		750	-5,62	750	-0,52
$\Delta I_1 = \Sigma I_{\text{вт}} - \Sigma I_{\text{пр}} = -0,52 + 5,62 = 5,1 \text{ ГДж}$					
$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2, T_2 = 823 \text{ K}$					
1	CO	617,6	-2,08	-	-
2	H ₂ O	397	-4,91	-	-
3	CO ₂	-	-	970,5	-8,15
4	H ₂	-	-	44,1	0,34
Разом		1014,6	-6,99	1014,6	-7,81
$\Delta I_2 = \Sigma I_{\text{вт}} - \Sigma I_{\text{пр}} = -7,81 + 6,99 = -0,82 \text{ ГДж}$					
$(\text{N}_2; \text{O}_2) \rightarrow 0,79 \text{ N}_2 + 0,21 \text{ O}_2, T_3 = 123 \text{ K}$					
1	Повітря (N ₂ ; O ₂)	1042,4	18,5	-	-
2	N ₂	-	-	823,5	0,0018
3	O ₂	-	-	218,9	0,0004
Разом		1042,4	18,5	1042,4	0,0022
$\Delta I_3 = \Sigma I_{\text{вт}} - \Sigma I_{\text{пр}} = 0,0022 - 18,5 = -18,498 \text{ ГДж}$					
$\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{NH}_3, T_4 = 423 \text{ K}$					
1	N ₂	823,5	1,51	-	-
2	H ₂	176,5	0,32	-	-
3	NH ₃	-	-	1000	-2,42
Разом		1000	1,83	1000	-2,42
$\Delta I_4 = \Sigma I_{\text{вт}} - \Sigma I_{\text{пр}} = -2,42 - 1,83 = -4,25 \text{ ГДж}$					
$\Delta I = \Delta I_1 + \Delta I_2 + \Delta I_3 + \Delta I_4 = 5,1 - 0,82 - 18,498 - 4,25 = -18,468 \text{ ГДж}$					

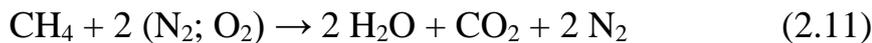
Відмінністю такого способу одержання аміаку від попереднього є те, що кисень повітря перетворюється в CO_2 , а азот отримують у результаті спалювання метану за реакцією (2.7).

Проводимо розрахунки матеріального та ентальпійного балансу, визначаємо температуру протікання реакції, як і для попереднього варіанта отримання аміаку, одержані дані зводимо у таблицю 2.3.

Дебаланс ΔI – негативний, тому для підтримки стійкого протікання процесу із системи необхідно відводити 21,155 ГДж енергії.



Варіант 3

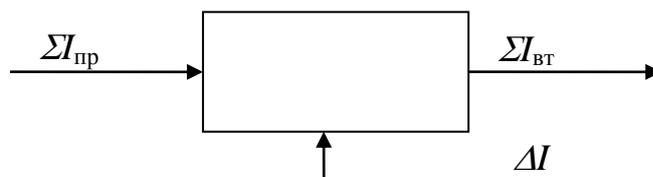


У третьому варіанті отримання аміаку водень є продуктом кисневої конверсії метану та парової конверсії CO , реакції (2.9) та (2.10) відповідно.

За реакцією (2.9) частково використовується кисень повітря, отже, частина азоту не буде використана в синтезі аміаку та буде баластом у даному процесі.

Проводимо розрахунки матеріального та ентальпійного балансу, визначаємо температуру протікання реакції, як і для попередніх варіантів отримання аміаку, отримані дані зводимо у таблицю 2.4.

Дебаланс ΔI – позитивний, тому для підтримки стійкого протікання процесу в систему необхідно підвести енергію 11,451 ГДж.



Таблиця 2.3 – Результати розрахунку ентальпійних потоків для другого варіанта отримання аміаку

№ з/п	Речовина	Прихід		Витрата	
		G, кг	I, ГДж	G, кг	I, ГДж
$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2, T_1 = 1023 \text{ K}$					
1	CH ₄	353	-0,88	–	–
2	H ₂ O	397	-4,74	–	–
3	CO	–	–	617,6	-1,94
4	H ₂	–	–	132,4	1,42
Разом		750	-5,62	750	-0,52
$\Delta I_1 = \Sigma I_{\text{вт}} - \Sigma I_{\text{пр}} = -0,52 + 5,62 = 5,1 \text{ ГДж}$					
$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2, T_2 = 823 \text{ K}$					
1	CO	617,6	-2,08	–	–
2	H ₂ O	397	-4,91	–	–
3	CO ₂	–	–	970,5	-8,15
4	H ₂	–	–	44,1	0,34
Разом		1014,6	-6,99	1014,6	-7,81
$\Delta I_2 = \Sigma I_{\text{вт}} - \Sigma I_{\text{пр}} = -7,81 + 6,99 = -0,82 \text{ ГДж}$					
$\text{CH}_4 + 2 (\text{N}_2; \text{O}_2) \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2 \text{N}_2, T_3 = 350 \text{ K}$					
1	CH ₄	54,7	-0,25	–	–
2	Повітря (N ₂ ; O ₂)	1042,4	18,5	–	–
3	H ₂ O	–	–	123,1	-1,64
4	CO ₂	–	–	150,5	-1,34
5	N ₂	–	–	823,5	0,045
Разом		1097,1	18,25	1097,1	-2,935
$\Delta I_3 = \Sigma I_{\text{вт}} - \Sigma I_{\text{пр}} = -2,935 - 18,5 = -21,185 \text{ ГДж}$					
$\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{NH}_3, T_4 = 423 \text{ K}$					
1	N ₂	823,5	1,51	–	–
2	H ₂	176,5	0,32	–	–
3	NH ₃	–	–	1000	-2,42
Разом		1000	1,83	1000	-2,42
$\Delta I_4 = \Sigma I_{\text{вт}} - \Sigma I_{\text{пр}} = -2,42 - 1,83 = -4,25 \text{ ГДж}$					
$\Delta I = \Delta I_1 + \Delta I_2 + \Delta I_3 + \Delta I_4 = 5,1 - 0,82 - 21,185 - 4,25 = -21,155 \text{ ГДж}$					

Таблиця 2.4 – Результати розрахунку ентальпійних потоків для третього варіанта отримання аміаку

№ з/п	Речовина	Прихід		Витрата	
		G, кг	I, ГДж	G, кг	I, ГДж
$2 \text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO} + 4 \text{H}_2, T_1 = 350 \text{ K}$					
1	CH ₄	564,8	-41,3	-	-
2	O ₂	564,8	0,026	-	-
3	CO	-	-	988,4	-3,85
4	H ₂	-	-	141,2	0,11
Разом		1129,6	-41,274	1129,6	-3,74
$\Delta I_1 = \Sigma I_{\text{вт}} - \Sigma I_{\text{пр}} = -3,74 + 41,274 = 37,534 \text{ ГДж}$					
$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2, T_2 = 823 \text{ K}$					
1	CO	494,2	-1,67	-	-
2	H ₂ O	317,7	-3,93	-	-
3	CO ₂	-	-	776,6	-6,52
4	H ₂	-	-	35,3	0,272
Разом		811,9	-5,6	811,9	-6,248
$\Delta I_2 = \Sigma I_{\text{вт}} - \Sigma I_{\text{пр}} = -6,248 + 5,6 = -0,648 \text{ ГДж}$					
$\text{CH}_4 + 2 (\text{N}_2; \text{O}_2) \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2 \text{N}_2, T_3 = 350 \text{ K}$					
1	CH ₄	54,7	-0,25	-	-
2	Повітря (N ₂ ; O ₂)	1042,4	18,5	-	-
3	H ₂ O	-	-	123,1	-1,64
4	CO ₂	-	-	150,5	-1,34
5	N ₂	-	-	823,5	0,045
Разом		1097,1	18,25	1097,1	-2,935
$\Delta I_3 = \Sigma I_{\text{вт}} - \Sigma I_{\text{пр}} = -2,935 - 18,5 = -21,185 \text{ ГДж}$					
$\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{NH}_3, T_4 = 423 \text{ K}$					
1	N ₂	823,5	1,51	-	-
2	H ₂	176,5	0,32	-	-
3	NH ₃	-	-	1000	-2,42
Разом		1000	1,83	1000	-2,42
$\Delta I_4 = \Sigma I_{\text{вт}} - \Sigma I_{\text{пр}} = -2,42 - 1,83 = -4,25 \text{ ГДж}$					
$\Delta I = \Delta I_1 + \Delta I_2 + \Delta I_3 + \Delta I_4 = 37,534 - 0,648 - 21,185 - 4,25 = 11,451 \text{ ГДж}$					

2.4. Висновок

Наведений термодинамічний аналіз трьох варіантів одержання аміаку показав, що з енергетичної точки зору найкращим є другий варіант, тому що із системи виводиться 21,155 ГДж енергії, але остаточний висновок можна зробити після техніко-економічного аналізу (наявності сировини, енергоресурсів і т.д.). Слід зазначити, що не завжди ефективні з точки зору енергетики технології є конкурентоспроможними на світовому ринку. Основне завдання, яке відводиться при цьому технологу, – це пошук оптимального співвідношення між затратами на сировину та витратами енергії на отримання готового продукту.

3. ВАРІАНТИ КОНТРОЛЬНИХ ЗАВДАНЬ

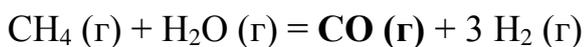
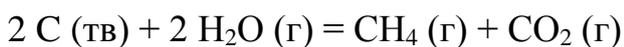
Розрахункова робота повинна включати такі розділи:

- Вступ (наводиться оцінювання наявності сировини для здійснення процесу, напрямки використання готового продукту та його потреба у народному господарстві та/або промисловості).
- Хімізм процесу та його технологічна (принципова) схема.
- Розрахунок матеріального балансу.
- Визначення температури протікання реакції $\Delta G = f(T)$.
- Розрахунок ентальпійного балансу.
- Аналіз отриманих даних та висновки.
- Список використаної літератури.

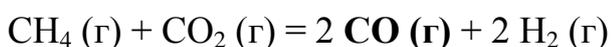
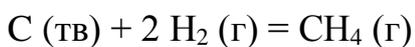
Розрахувати матеріальний та ентальпійний баланс отримання 1 т *готового продукту* та зробити висновок щодо ефективності з точки зору енергетики першого або другого способу його отримання.

Варіант 1

Перший спосіб:

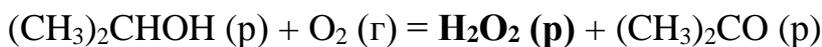
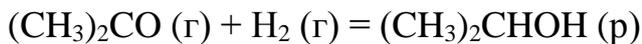


Другий спосіб:

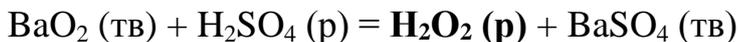
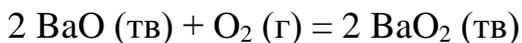


Варіант 2

Перший спосіб:

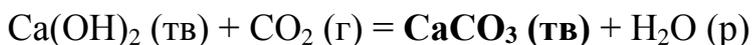
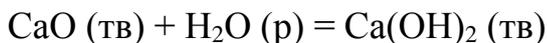


Другий спосіб:

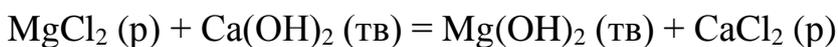


Варіант 3

Перший спосіб:

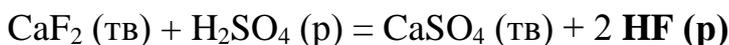
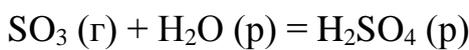


Другий спосіб:

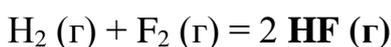
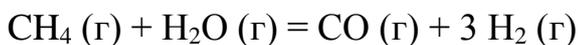


Варіант 4

Перший спосіб:

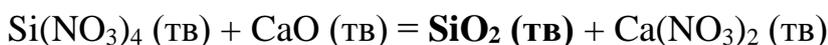


Другий спосіб:



Варіант 5

Перший спосіб:

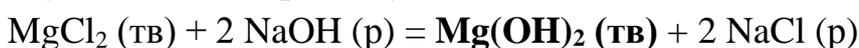
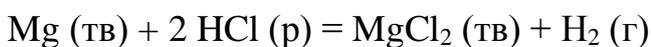


Другий спосіб:

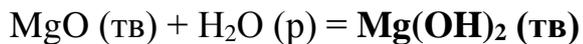
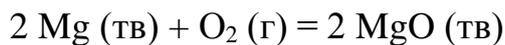


Варіант 6

Перший спосіб:

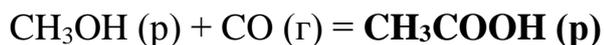
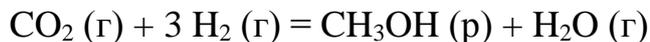


Другий спосіб:

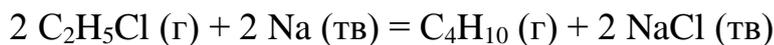


Варіант 7

Перший спосіб:

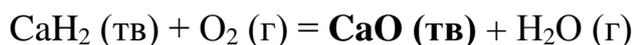
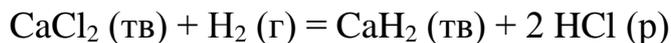


Другий спосіб:

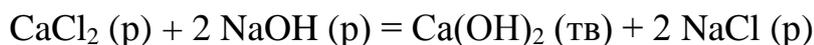


Варіант 8

Перший спосіб:

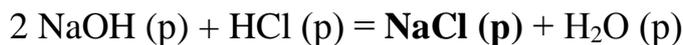
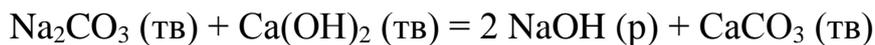


Другий спосіб:

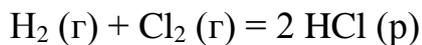


Варіант 9

Перший спосіб:

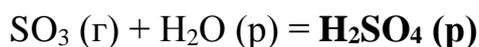


Другий спосіб:

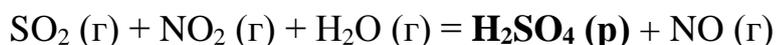
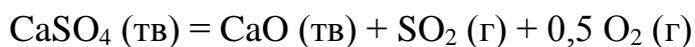


Варіант 10

Перший спосіб:

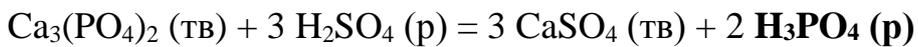
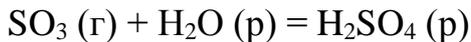


Другий спосіб:

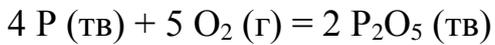


Варіант 11

Перший спосіб:

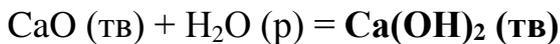


Другий спосіб:

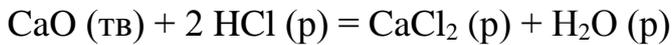


Варіант 12

Перший спосіб:

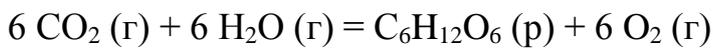


Другий спосіб:

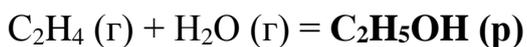


Варіант 13

Перший спосіб:

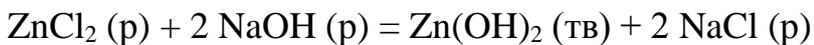


Другий спосіб:

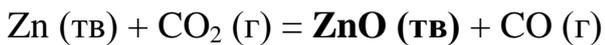
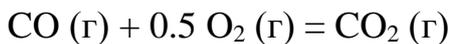


Варіант 14

Перший спосіб:

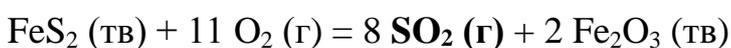
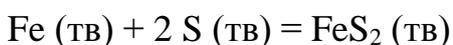


Другий спосіб:



Варіант 15

Перший спосіб:

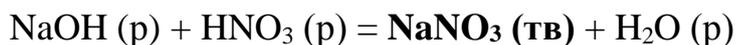
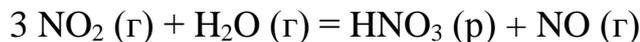


Другий спосіб:

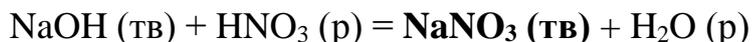
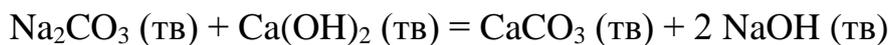


Варіант 16

Перший спосіб:

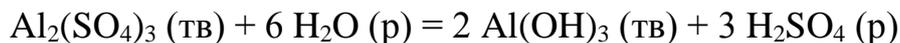


Другий спосіб:

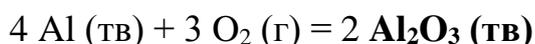


Варіант 17

Перший спосіб:

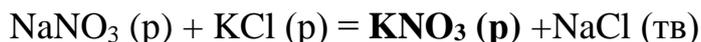
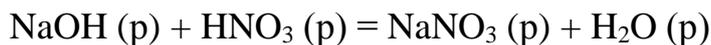


Другий спосіб:

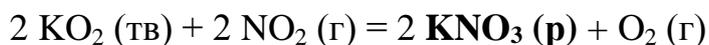


Варіант 18

Перший спосіб:

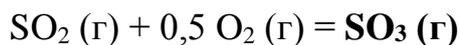
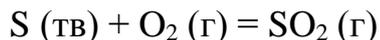


Другий спосіб:

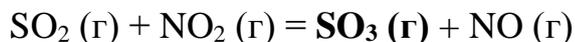


Варіант 19

Перший спосіб:

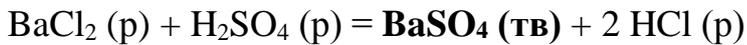
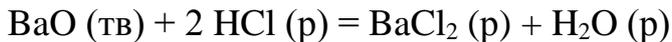


Другий спосіб:

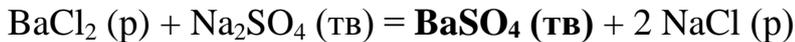
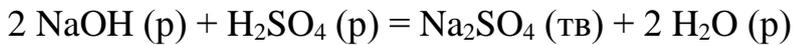


Варіант 20

Перший спосіб:

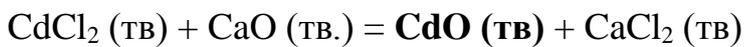
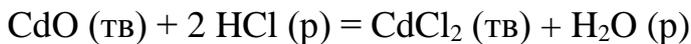


Другий спосіб:

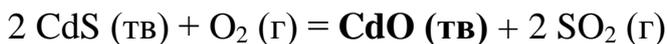


Варіант 21

Перший спосіб:



Другий спосіб:

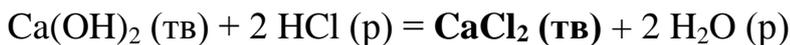
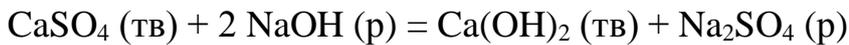


Варіант 22

Перший спосіб:

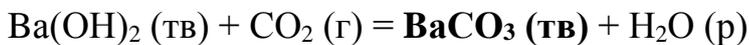
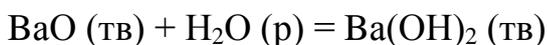


Другий спосіб:

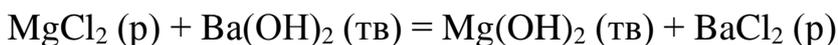


Варіант 23

Перший спосіб:

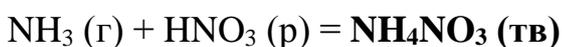
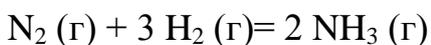


Другий спосіб:

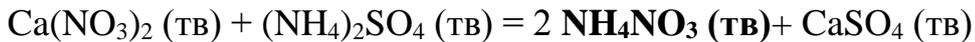
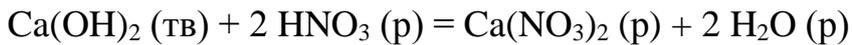


Варіант 24

Перший спосіб:

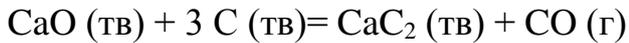


Другий спосіб:

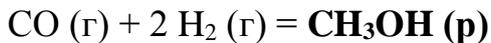
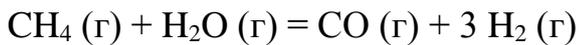


Варіант 25

Перший спосіб:

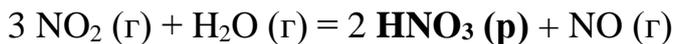
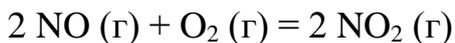


Другий спосіб:

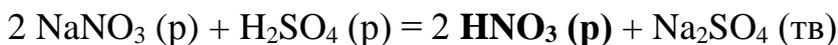
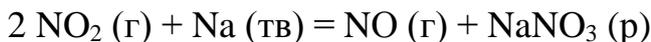


Варіант 26

Перший спосіб:

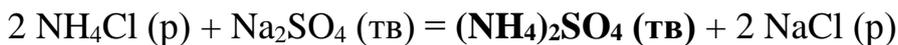
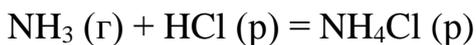


Другий спосіб:

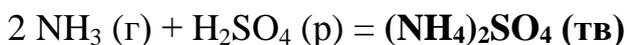
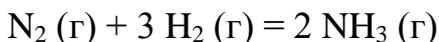


Варіант 27

Перший спосіб:

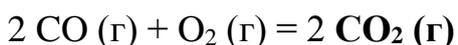
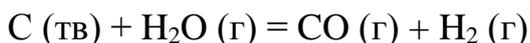


Другий спосіб:

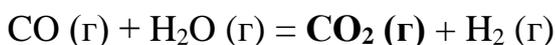


Варіант 28

Перший спосіб:

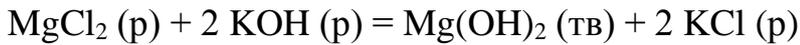


Другий спосіб:

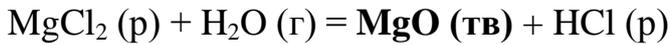
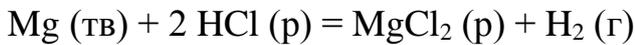


Варіант 29

Перший спосіб:

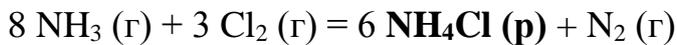
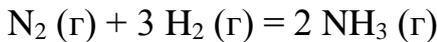


Другий спосіб:

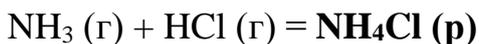
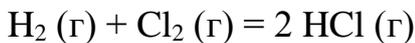


Варіант 30

Перший спосіб:

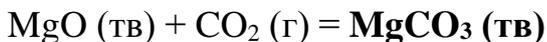


Другий спосіб:

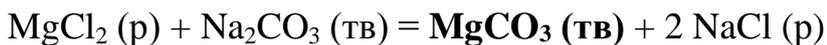
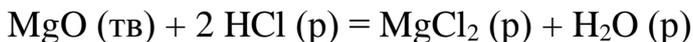


Варіант 31

Перший спосіб:

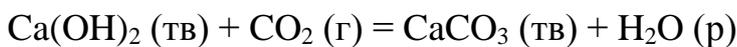


Другий спосіб:

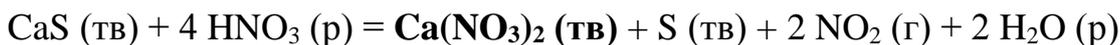


Варіант 32

Перший спосіб:

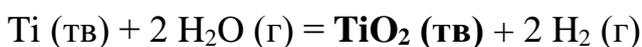
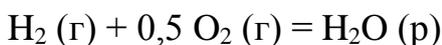


Другий спосіб:

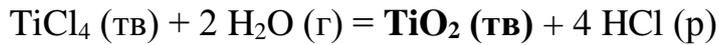
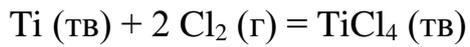


Варіант 33

Перший спосіб:

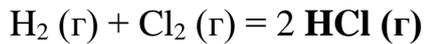


Другий спосіб:

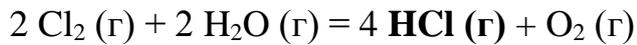
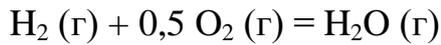


Варіант 34

Перший спосіб:

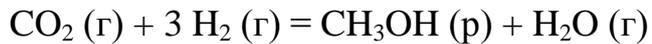


Другий спосіб:



Варіант 35

Перший спосіб:



Другий спосіб:



СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ефимова А.И. Свойства неорганических соединений / А.И. Ефимова. – Л.: Химия, 1983. – 392 с.
2. Киреев В.А. Методы практических расчетов в термодинамике химических реакций / В.А. Киреев. – М.: Химия, 1970. – 210 с.
3. Карапетьянц М.Х. Химическая термодинамика / М.Х. Карапетьянц. – Химия, 1975. – 584 с.
4. Янковский Н.А. Аммиак. Вопросы технологии / Н.А. Янковский. – Донецк: ГИК «Новая печать», 2001. – 497 с.
5. Наринский Г.Б. Ректификация воздуха / Г.Б. Наринский. – М.: Машиностроение, 1988. – 248 с.

ДОДАТОК А

Основні термодинамічні показники

Речовина	Фаза	ΔH^{298} , кДж/моль	S^{298} , Дж/(моль·К)	Коефіцієнти рівняння $C_p = f(T)$				Температурний інтервал
				a	$b \cdot 10^3$	$c^1 \cdot 10^{-5}$	$c \cdot 10^6$	
Al	тв	0	28,31	20,67	12,39	–	–	298 – 933
AlCl ₃	тв	– 697,4	167,0	55,44	117,15	–	–	273 – 453
Al ₂ O ₃	тв	– 1675	50,94	114,56	12,89	– 34,31	–	298 – 1800
Al(OH) ₃	тв	– 1273,6	85,4	93,2	–	–	–	298
Al ₂ (SO ₄) ₃	тв	– 3434	239,2	366,3	62,6	– 111,6	–	298 – 1100
BaCO ₃	тв	– 1202	112,1	86,9	49,0	– 11,97	–	273 – 1040
BaO	тв	– 556,6	70,3	53,30	4,35	– 8,30	–	298 – 1270
BaO ₂	тв	– 630,1	77,5	56,9	8,4	–	–	–
Ba(OH) ₂	тв	– 946,1	103,8	70,7	91,6	–	–	298 – 680
BaCl ₂	тв	– 859,8	125,5	71,13	13,97	–	–	273 – 1198
BaSO ₄	тв	1465	131,8	141,4	–	– 35,27	–	273 – 1300
C	алмаз	1,891	2,38	9,12	13,22	– 6,19	–	273 – 2300
C	графіт	0	5,74	17,15	4,27	– 8,79	–	273 – 713
CCl ₄	г	– 106,7	309,7	97,65	9,62	– 15,06	–	298 – 1000
CH ₃ OH	р	– 238,7	126,7	81,6	–	–	–	298
CH ₃ OH	г	– 201,2	239,7	15,28	105,2	–	31,04	298 – 1000
CH ₄	г	– 74,85	186,19	17,45	60,46	–	– 1,117	298 – 1500
CO	г	– 110,5	197,4	28,41	4,10	– 0,46	–	298 – 2500
CH ₂ O	г	– 115,9	218,8	18,82	58,38	–	– 15,61	298 – 1500
C ₂ H ₅ OH	г	– 235,3	282,0	19,07	212,7	–	– 108,6	298 – 1500
(CH ₃) ₂ CO	г	– 216,4	294,9	22,47	201,8	–	– 63,5	298 – 1500
(CH ₃) ₂ CO	р	– 247,7	200	125	–	–	–	298 – 1500
CO ₂	г	– 393,51	213,6	44,14	9,04	– 8,53	–	298 – 2500
CH ₃ COOH	г	– 437,4	282,5	5,56	243,5	–	– 151,9	298 – 1500
C ₂ H ₄	г	52,28	219,4	4,196	154,59	–	– 81,09	298 – 1500
(CH ₃) ₂ CHOH	р	– 318,7	180	153,4	–	–	–	298 – 1500
C ₂ H ₅ Cl	г	– 105,0	274,8	13,07	188,5	–	– 71,94	298 – 1500
C ₄ H ₁₀	г	– 124,7	310	0,469	385,38	–	– 198,88	298 – 1500
C ₆ H ₁₂ O ₆	тв	– 1051	287,16	261,06	–	–	–	–
CaC ₂	α	– 62,7	70,3	68,62	11,88	– 8,66	–	298 – 720
CaCO ₃	тв	– 1206	92,9	104,5	21,92	– 25,94	–	298 – 1200
CaCl ₂	тв	– 785,8	113,8	71,88	12,72	– 2,5	–	298 – 1055
CaF ₂	α	1214	68,87	59,83	30,46	1,96	–	298 – 1000
CaH ₂	тв	188,8	41,87	33,46	–	–	–	–
Ca(NO ₃) ₂	тв	– 936,9	193,2	122,9	134	– 17,28	–	298 – 800

Продовження додатка А

Речовина	Фаза	ΔH^{298} , кДж/моль	S^{298} , Дж/(моль·К)	Коефіцієнти рівняння $C_p = f(T)$				Температурний інтервал
				a	$b \cdot 10^3$	$c \cdot 10^{-5}$	$c \cdot 10^6$	
CaO	тв	-635,1	39,7	49,63	4,52	-6,95	-	298 – 1800
Ca(OH) ₂	тв	-986,2	(83,4)	105,2	12	-19	-	298 – 600
Ca ₃ (PO ₄) ₂	тв	-4125	240,9	201,8	166	-20,92	-	298 – 1373
CaS	тв	-478,3	56,5	42,68	15,90	-	-	273 – 1000
CaSO ₄	тв	-1424	106,7	70,21	98,74	-	-	299 – 1400
Cd	α	0	51,76	22,22	12,30	-	-	298 – 2000
CdCl ₂	тв	-389	115,3	61,25	40,17	-	-	273 – 841
CdO	тв	-256,1	54,8	40,38	8,70	-	-	273 – 1200
CdS	тв	-144,3	71,0	54	3,8	-	-	273 – 1273
CdSO ₄	тв	-925,9	128,1	77,32	77,4	-	-	278 – 1273г
Cl ₂	г	0	223	36,69	1,05	-2,52	-	298 – 650
F ₂	г	0	202,9	34,69	1,84	-3,35	-	298 – 700
Fe	α	0	27,15	19,25	21	-	-	298
Fe ₂ O ₃	тв	-821,32	89,96	97,74	72,13	-12,89	-	298 – 1000
FeS ₂	тв	-177,40	53,14	74,81	5,52	-12,76	-	298 – 1000
H ₂	г	0	130,6	27,28	3,26	0,502	-	500 – 2000
HCl	г	-92,30	186,70	26,53	4,60	1,09	-	298 – 2000
HF	г	-268,61	173,51	27,70	2,93	-	-	298 – 2000
HNO ₃	р	-173	156,16	109,87	-	-	-	300
HNO ₃	г	-133,90	266,39	58,58	-	-	-	300
H ₂ O	г	-241,84	188,74	30	10,71	0,33	-	298 – 2500
H ₂ O	р	-285,84	69,96	75,31	-	-	-	298
H ₂ O	тв	-291,85	39,33	-0,197	140,16	-	-	273
H ₂ O ₂	р	-187,02	105,86	53,6	117,15	-	-	298 – 450
H ₃ PO ₄	р	-1271,94	200,83	106,1	-	-	-	298
H ₂ S	г	-20,15	205,64	29,37	15,40	-	-	298 – 1800
H ₂ SO ₄	р	-811,30	156	137,57	-	-	-	298
KCl	тв	-435,89	82,68	41,38	21,76	3,22	-	298 – 1000
KO ₂	тв	-283	116,8	62,8	50,2	-	-	-
KOH	тв	-425,93	59,41	100,32	-	-	-	298
KNO ₃	α	-492,71	132,93	60,88	118,63	-	-	287 – 401
Mg	тв	0	32,55	22,3	10,64	-0,42	-	298 – 923
MgCO ₃	тв	-1096,21	65,69	77,91	57,74	-17,41	-	298 – 750
MgCl ₂	тв	-641,83	89,54	79,08	5,94	-8,62	-	298 – 900
MgO	тв	-601,24	26,94	42,59	7,28	-6,19	-	298 – 1100
Mg(OH) ₂	тв	-924,66	63,14	54,56	66,11	-	-	298 – 600

Продовження додатка А

Речовина	Фаза	ΔH^{298} , кДж/моль	S^{298} , Дж/(моль·К)	Коефіцієнти рівняння $C_p = f(T)$				Температурний інтервал
				a	$b \cdot 10^3$	$c^1 \cdot 10^{-5}$	$c \cdot 10^6$	
N ₂	г	191,5	27,87	4,27	–	29,10	–	298 – 2500
NH ₃	г	–46,19	192,5	29,8	25,48	–1,67	–	298 – 1800
NH ₄ Cl	β	–315,39	94,56	49,37	133,89	–	–	298 – 458
NH ₄ NO ₃	тв	–365,10	150,60	170,152	–	–	–	298
(NH ₄) ₂ SO ₄	тв	–1179,30	220,30	103,64	281,16	–	–	275 – 600
NO	г	90,37	210,62	29,58	3,85	–0,59	–	298 – 2500
NO ₂	г	33,89	240,45	42,93	8,54	–6,74	–	298 – 2000
Na	тв	0	51,42	20,92	22,43	–	–	298 – 371
NaBr	тв	–359,8	83,7	49,66	8,79	–	–	298 – 550
Na ₂ CO ₃	тв	– 1129	136	70,63	135,6	–	–	298 – 723
NaCl	тв	–410,9	72,36	45,94	16,32	–	–	298 – 1073
NaHCO ₃	тв	–947,4	102,1	87,72	–	–	–	289
NaNO ₃	α	–466,5	116,3	25,69	225,94	–	–	298 – 550
NaOH	α	–426,6	64,18	7,34	125	13,38	–	298 – 566
Na ₂ SO ₄	α	–1384	149,4	65	220,9	–	–	298 – 518
Na ₂ SiO ₃	тв	–1518	113,8	130,3	40,17	–27,02	–	298 – 13605
O ₂	г	0	205,03	31,46	3,39	–3,77	–	298 – 3000
P	тв	–18,41	22,8	19,83	16,32	–	–	298 – 800
P ₂ O ₅		–1507,2	140,3	35,064	22,61	–	–	–
P ₄ O ₁₀	тв	–3096	280	70,08	451,9	–	–	298 – 631
S	монок	0,3	32,55	14,90	29,08	–	–	368 – 392
S	ромб	0	31,88	14,98	26,11	29,08	–	368 – 392
SO ₂	г	–296,9	248,1	42,55	12,55	–5,65	–	298 – 1800
SO ₃	г	–395,2	256,23	57,32	26,86	–13,05	–	298 – 1200
SiO ₂	кварц α	–859,3	42,09	46,94	34,31	–11,3	–	298 – 848
SiO ₂	тридим α	–856,9	43,93	13,68	103,8	–	–	298 – 390
SiO ₂	кристоб α	–857,7	43,26	13,68	103,8	–	–	298 – 500
Ti	α	0	30,66	22,09	10,04	–	–	298 – 1155
TiCl ₄	г	–759,8	352	106,5	1	–9,87	–	298 – 2000
TiO ₂	рутил	–943,9	50,23	71,71	4,1	–14,04	–	298 – 1800
Zn	тв	0	41,59	22,38	10,04	–	–	273 – 693
ZnCl ₂	тв	–349,6	136	67,78	38,74	–	–	298 – 520
ZnO	тв	–286	56,74	39,96	14,64	–	–	273 – 1500
Zn(OH) ₂	тв	–642,7	85	74,15	–	–	–	290 – 323

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1. Основні закони та рівняння.....	4
1.1. Закон збереження маси.....	4
1.2. Енергія Гіббса і напрямок протікання реакції.....	5
1.3. Закон збереження енергії.....	6
2. Приклад розрахунку реакції синтезу аміаку.....	8
2.1. Розрахунок матеріального балансу.....	8
2.2. Визначення температури протікання реакції.....	9
2.3. Розрахунок ентальпійного балансу.....	12
2.4. Висновок.....	16
3. Варіанти контрольних завдань.....	18
Список літератури.....	28
Додаток А. Основні термодинамічні показники.....	29

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до розрахункового завдання

“Обґрунтування вибору енергоефективних витрат сировини
в хімічній технології”

з дисциплін

“Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів”

для студентів спеціальності 6.05130101

“Хімічні технології неорганічних речовин” і

«Контроль та керування хіміко-технологічними процесами»

для студентів спеціальності 6.05020201

“Автоматизоване управління технологічними процесами”

денної та заочної форм навчання

Укладачі: **ДЕЙНЕКА** Дмитро Миколайович
САВЕНКОВ Анатолій Сергійович
ЛОБОЙКО В'ячеслав Олексійович
ДЕЙНЕКА Вікторія Володимирівна

Відповідальний за випуск *О.Я. Лобойко*
Роботу до видання рекомендував *Я.М. Пітак*

Редактор Л.А. Пустовойтова

План 2012 р. поз. 81 / 78-12

Підп. до друку Формат 60x84 1/16. Папір офсетний.

Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman. Обл. вид. арк. 1,3

Наклад 50 прим. Зам. № Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ „ХП”.

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №3657 від 24.12.2009 р.

61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня НТУ „ХП”.

61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

