

УДК 661.25

*В.К. Лукашов, С.М. Романько, С.В. Тимофіїв***МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КОНЦЕНТРУВАННЯ РОЗЧИНУ СУЛЬФАТНОЇ КИСЛОТИ ВИПАРОВУВАННЯМ У ПОТІК НЕЙТРАЛЬНОГО ГАЗУ****Шосткинський інститут Сумського державного університету**

На підставі розробленої математичної моделі досліджено процес концентрування розчину сульфатної кислоти випаровуванням у потік нейтрального (інертного) газу при нагріванні кислоти через стінку апарата. Такий процес дозволяє виконувати концентрування при атмосферному тиску і температурі нижче температури кипіння кислоти, що дає можливість використовувати низькотемпературні (100–200°C) теплоносії. При розробці моделі були прийняті фізичні уявлення, згідно з якими розчин сірчаної кислоти розглядається як суміш двох компонентів (сульфатної кислоти і води) значно відмінних за леткістю, при випаровуванні відсутній опір з боку рідкої фази, пари компонентів досить швидко змішуються з нейтральним газом. Математичний опис процесу концентрування включає рівняння матеріальних балансів для розчину в цілому і води, рівняння масовіддачі в газову фазу при випаровуванні, рівняння відносного вмісту компонентів розчину сірчаної кислоти в газовій фазі, а також емпіричні рівняння, отримані виходячи з раніше здійснених експериментальних досліджень. В результаті досліджень встановлено закономірності зміни складу кислоти під час концентрування при різних параметрах процесу у випадку використання повітря в якості нейтрального газу. Отриманий алгоритм розрахунку процесу може бути використаний для визначення раціональних режимів концентрування.

Ключові слова: моделювання, сульфатна кислота, концентрування, нейтральний газ, швидкість випаровування, масовіддача.

Вступ

Одним з поширених способів концентрування розчину сульфатної кислоти в промисловості є барботажний спосіб, основою якого є випаровування розчину в потік топкових газів, що мають температуру 600–1000°C [1]. З огляду на те, що вони нейтральні стосовно компонентів кислоти, такий спосіб за своєю суттю є аналогічним відомому способу розділення рідких сумішей в потоці інертного газу (водяної пари). Незважаючи на це, відносно сульфатної кислоти, цей процес концентрування розроблений недостатньо. При його розрахунку наявність нейтрального (інертного) газу не враховують, в той час як даний фактор значною мірою впливає на концентрування [2].

Процес концентрування розчину сульфатної кислоти в присутності нейтрального газу можна організувати наступним чином: нагрівання розчину здійснювати через стінку апарата окремим теплоносієм, а через розчин (або над

його поверхнею) пропускати нейтральний газ, наприклад, повітря [3]. Такий варіант дозволяє виконувати концентрування при атмосферному тиску і температурі нижче ніж температура кипіння розчину кислоти, що дає можливість використовувати низькотемпературні (100–200°C) теплоносії (насичена водяна пара, електронагрівання).

Метою даної роботи є розробка математичної моделі періодичного процесу концентрування розчину сульфатної кислоти випаровуванням у потік нейтрального газу з нагріванням розчину кислоти через стінку апарата та дослідження за допомогою даної моделі залежності складу розчину кислоти від параметрів концентрування.

Постановка задачі моделювання

Зважаючи на складність даного процесу при розробці математичної моделі будемо виходити з наступних фізичних уявлень.

Розчин сульфатної кислоти будемо розглядати як суміш води з кислотою (моногідратом

сульфатного ангідриду $\text{SO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), а його концентрування – як процес випаровування цих компонентів, що мають різну леткість. При цьому враховуємо відому особливість сульфатної кислоти, яка полягає в тому, що при значеннях масової частки води більше 0,2 (до 80% кислоти) переважно випаровується вода, а при зниженні цього значення, в парі кислоти відбувається швидке збільшення кислоти [1]. Теоретично концентрування відбувається до концентрації кислоти в рідкій фазі 98,3% (азеотропна точка). Також використовуємо дані, згідно з якими наявність в системі нейтрального газу, відповідно до закону Дальтона, призводить до ефекту, який є аналогічним зниженню тиску, що й дозволяє здійснювати процес концентрування при температурі нижчій від температури кипіння розчину кислоти [4].

При математичному описі приймаємо наступні припущення:

– нехтуємо опором масоперенесення з боку рідкої фази, що можливо при достатньо інтенсивному її перемішуванні;

– вважаємо, що пара кислоти, яка утворилась внаслідок випаровування, досить швидко змішується з нейтральним газом.

Математичний опис виконаємо виходячи зі схеми, що наведена на рис. 1. Згідно з цією схемою, розчин кислоти з початковою масовою часткою води x_0 в кількості L (кг), що знаходиться в ємнісному апараті, нагрівається через дно апарата 1 до заданої температури t_k ($^{\circ}\text{C}$), яка потім підтримується постійною за рахунок регулювання кількості тепла, що підводиться. В

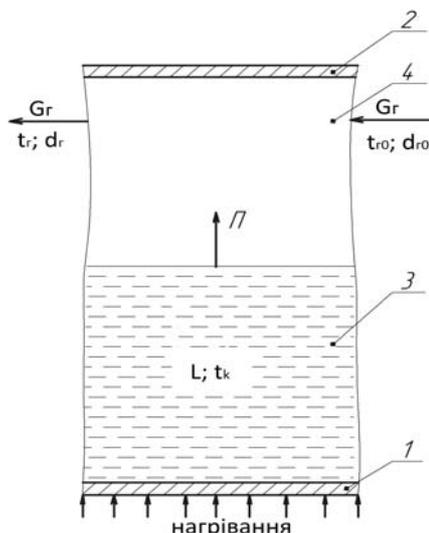


Рис. 1. Схема елемента системи концентрування розчину кислоти: 1 – дно апарата; 2 – кришка; 3 – кислота в рідкому стані; 4 – вільний простір

результаті нагрівання розчин випаровується (Π (кг/с) – потік пари компонентів розчину) у вільний простір апарата, що обмежений кришкою 2. В цей простір вводиться потік нейтрального газу G_r (кг/с), який захоплює пару компонентів розчину та у вигляді парогазової суміші виходить з апарата в атмосферу. За ключовий компонент у даному випадку приймаємо воду, тому потік нейтрального газу будемо характеризувати початковим вмістом вологи d_{r0} (кг води/кг сухого газу), температурою t_{r0} ($^{\circ}\text{C}$) на вході в апарат, а також вмістом вологи d_r (кг води/кг сухого газу) та температурою t_r ($^{\circ}\text{C}$) на виході з апарата.

Математичний опис процесу концентрування

Для математичного опису у даному випадку використаємо наступні рівняння:

– рівняння матеріального балансу в цілому для розчину кислоти:

$$-dL = dM, \quad (1)$$

де L – маса розчину кислоти, що знаходиться в апараті, кг; M – маса пари компонентів розчину кислоти, що утворюються, кг;

– рівняння матеріального балансу для води:

$$-d(Lx) = ydM, \quad (2)$$

де x – масова частка води в розчині кислоти; y – масова частка води в парі, що утворюється;

– рівняння масовіддачі води в газову фазу:

$$\beta(P_{\text{вн}} - P_{\text{в}})Fd\tau = ydM, \quad (3)$$

де β – коефіцієнт масовіддачі для води, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па}$; $P_{\text{вн}}$ – тиск насиченої водяної пари при температурі газової фази, Па; $P_{\text{в}}$ – парціальний тиск водяної пари в газовій фазі, Па; F – площа поверхні випаровування, м^2 ; τ – час, с;

– рівняння матеріального балансу води для потоку нейтрального газу:

$$G_r(d_r - d_{r0})d\tau = ydM, \quad (4)$$

де G_r – масовий потік (витрати) абсолютно сухого нейтрального газу, кг/с; d_r – вологовміст нейтрального газу на виході з апарата, кг води/кг газу; d_{r0} – вологовміст нейтрального газу на вході в апарат (початковий вологовміст), кг води/кг газу;

– рівняння відносного вмісту компонента розчину кислоти в газовій фазі:

– для води:

$$\frac{y_d dM}{G_r d\tau} = \frac{\mu_b P_b}{\mu_r P_r}, \quad (5)$$

– для кислоти:

$$\frac{y_n dM}{G_r d\tau} = \frac{\mu_n P_n}{\mu_r P_r}, \quad (6)$$

де P_r , P_n – парціальний тиск відповідно нейтрального газу та пари сульфатної кислоти в газовій фазі, Па; y_n – масова частка кислоти в парі; μ_b , μ_r , μ_n – маса одного кіломоля відповідно води, нейтрального газу та кислоти, кг/кмоль.

Для отримання розрахункових залежностей виконаємо перетворення наведених вище рівнянь. Виразивши зміну маси пари компонентів розчину через швидкість їх випаровування як:

$$dM = w F d\tau, \quad (7)$$

рівняння (2) викладемо у наступному вигляді:

$$-d(Lx) = y w F d\tau, \quad (8)$$

де w – швидкість випаровування розчину кислоти в потік нейтрального газу, кг/м²·с.

Перетворивши рівняння (8) з використанням рівняння (1) та виразу (7) отримаємо:

$$d\tau = \frac{L}{wF} \cdot \frac{dx}{x-y}. \quad (9)$$

Інтегруючи рівняння (9) в межах зміни часу та масової частки води в кислоті від початкових значень $t=0$, $x=x_0$ до поточних τ та x , отримаємо залежність, що пов'язує час концентрування зі складом кислоти:

$$\tau = \frac{1}{F} \int_{x_0}^x \frac{L}{w} \frac{dx}{y-x}. \quad (10)$$

З рівнянь (1) та (2) в результаті відповідних перетворень отримаємо:

$$\frac{dL}{L} = \frac{dx}{y-x}. \quad (11)$$

Інтегруючи рівняння (11) в межах зміни маси розчину кислоти та масової частки води в ньому від початкових значень $L=L_0$, $x=x_0$ до

поточних L та x , отримаємо залежність, яка пов'язує масу розчину кислоти з його складом:

$$\ln \frac{L_0}{L} = \int_{x_0}^x \frac{dx}{y-x}. \quad (12)$$

Рівняння (12) відрізняється від відомого рівняння Релея [6] тим, що при його виведенні не були задані умови рівноваги між x та y .

Використовуючи рівняння (7) та (3) отримаємо:

$$y = \frac{\beta}{w} (P_{вн} - P_b). \quad (13)$$

Величину парціального тиску пари води в газовій фазі P_b , яка входить до рівняння (13), можна знайти використавши рівняння (5) та (6) з застосуванням закону Дальтона, який в даному випадку буде мати вигляд:

$$P - P_r = P_b - P_n, \quad (14)$$

де P – загальний тиск в газовій фазі, Па.

Для цього з рівнянь (5) та (6) визначаємо парціальний тиск сульфатної кислоти з урахуванням того, що $y_n = 1 - y$:

$$P_n = \frac{(1-y)\mu_b P_b}{y\mu_n},$$

та підставивши його в рівняння (14) перетворимо останнє в наступний вигляд

$$P_r = P - a P_b, \quad (15)$$

$$\text{де } a = 1 + \frac{(1-y)\mu_b}{y\mu_n}.$$

Зважаючи на малу леткість сульфатної кислоти, вміст води в парі кислоти значною мірою переважає її вміст (для 90%-вої кислоти $y_n \approx 0,1$ [1]). Це дозволяє в практичних розрахунках приймати $a=1$.

Враховуючи, що ліва частина рівняння (5) є складовою вологовмісту нейтрального газу, що утворюється за рахунок випаровування води з розчину кислоти, дане рівняння можна записати у вигляді:

$$d_r - d_{r0} = \frac{\mu_b P_b}{\mu_r P_r}, \quad (16)$$

тоді виходячи з рівнянь (15) та (16) отримуємо:

$$P_B = \frac{(d_r - d_{r0})\mu_r P}{\mu_B + a(d_r - d_{r0})\mu_r} \quad (17)$$

Величина загального тиску у газовій фазі, що входить у формулу (17) виражається як сума тисків:

$$P = B \pm P_{\text{над}}, \quad (18)$$

де B – атмосферний тиск, Па; $P_{\text{над}}$ – надлишковий тиск в середині апарата, який в залежності від того як буде налагоджений процес подачі потоку нейтрального газу приймають зі знаком «+» при його нагнітанні або зі знаком «-» при відсмоктуванні (розрідженні).

Складову вологовмісту нейтрального газу, що утворилась за рахунок випаровування води з розчину кислоти, яка також входить до формули (17), знаходимо використовуючи цю формулу і рівняння (3) та (4). В результаті відповідних перетворень отримаємо квадратне рівняння вигляду:

$$(d_r - d_{r0})^2 + \rho(d_r - d_{r0}) - q = 0, \quad (19)$$

$$\text{де } \rho = \frac{\mu_B}{a\mu_r} + \frac{\beta F}{G_r} \left(\frac{P - aP_{\text{вн}}}{a} \right), \quad q = \beta F P_{\text{вн}} \mu_B.$$

За величину цієї складової приймаємо дійсний додатний корінь рівняння (19).

Необхідні для розрахунку процесу концентрування значення швидкості випаровування розчину кислоти w та коефіцієнт масовіддачі води в газову фазу β , при використанні в якості нейтрального газу повітря, можуть бути знайдені за емпіричними рівняннями, які одержано в роботах [5,6]. Ці рівняння мають наступний вигляд:

$$w = w_0 e^{k_w x}, \quad (20)$$

$$Nu_d = Nu_{d0} e^{k_\beta x}, \quad \beta = \frac{Nu_d D}{\delta} \frac{\mu_B}{RT_r}, \quad (21)$$

де w_0 , Nu_{d0} , k_w , k_β – експериментально визначені коефіцієнти; R – універсальна газова стала, Дж/кмоль·К; T_r – температура газової фази, К; δ – діаметр апарата (вільної поверхні кислоти), м; D – коефіцієнт дифузії пари води в повітря, м²/с.

Опис алгоритму розрахунку

Визначення зміни складу кислоти в часі в залежності від умов здійснення процесу концентрування, які задаються параметрами L_0 , x_0 , v , F , t_k , t_{r0} , d_{r0} , δ виконували у нижчеописаній послідовності.

Для конкретного набору зазначених параметрів на підставі раніше отриманих експериментальних даних визначаємо значення коефіцієнтів у рівняннях (20) та (21): w_0 , Nu_{d0} , k_w , k_β . При цьому необхідно враховувати можливість переходу через критичне значення масової частки води у розчині кислоти $x_k \approx 0,2$. Потім, задаючи значення масової частки води в кислоті x_i (через рівні інтервали) в діапазоні її зміни від початкового значення x_0 до кінцевого (заданого) значення x_n , для кожного x_i виконуємо наступний розрахунок:

1. Використовуючи рівняння (20) та (21) розраховуємо значення швидкості випаровування кислоти w_i та коефіцієнта масовіддачі води в газову фазу β_i .

2. Приймаючи за температуру газової фази

(парогазової суміші) $t_r = \frac{t_k + t_{r0}}{2}$, з довідкових

таблиць визначаємо значення тиску насиченої водяної пари $P_{\text{вн}}$ та, вважаючи, що $a=1$, розраховуємо коефіцієнти рівняння (19). В результаті його рішення знаходимо величину $(d_r - d_{r0})_i$ та визначаємо загальний вологовміст нейтрального газу (газової фази) як:

$$d_{ri} = d_{r0} + (d_r - d_{r0})_i.$$

3. Знаходимо за формулою (17) значення парціального тиску пари води в газовій фазі $P_{\text{вн}}$. При цьому, враховуючи, що при проходженні повітря через апарат $P_{\text{над}}$ зазвичай має невелике значення, можна прийняти $P=B$.

4. Використовуючи рівняння (13) розраховуємо значення масової частки води в парі кислоти y_i . При цьому враховуючи умову $y_i \leq 1$, при розрахунковому значенні $y_i > 1$ приймаємо $y=1$.

5. Розраховуємо підінтегральну функцію рівняння (12):

$$f_i(x) = \frac{1}{y_i - x_i},$$

та, використовуючи методи наближеного інтегрування, послідовно для кожного значення x_i розраховуємо значення інтегралу:

$$I(x_i) = \int_{x_0}^{x_i} f_1(x) dx .$$

6. Використовуючи значення інтегралів $I(x_i)$ за формулою, яку отримаємо з рівняння (12) розраховуємо для відповідних значень x_i масу розчину кислоти:

$$L_i = L_0 e^{I(x_i)} .$$

7. Розраховуємо підінтегральну функцію рівняння (10):

$$\varphi_i(x_i) = \frac{L_i}{W} f_1(x_i) ,$$

та обчислюємо, як і в попередньому випадку, значення інтегралу:

$$J(x_i) = \int_{x_0}^{x_i} \varphi(x_i) dx ,$$

з наступним визначенням часу при якому досягається задане значення x_i :

$$\tau_i = \frac{J(x_i)}{F} .$$

8. За результатами виконаних розрахунків будемо залежність $x_i = f(\tau_i)$, яка відповідає заданим параметрам процесу концентрування.

Результати дослідження

За описаним вище алгоритмом були виконані розрахунки процесу концентрування розчину сульфатної кислоти в діапазоні зміни його параметрів, який відповідав їх змінам при експериментальному визначенні коефіцієнтів рівнянь (20) та (21) [5,6]. В якості нейтрального газу розглядали повітря. Результати такого моделювання процесу концентрування надавали у вигляді графічних залежностей відносної масової частки води від часу, які характеризують зміни складу розчину кислоти при його концентруванні (рис. 2).

Аналіз отриманих даних показує, що з підвищенням температури нагрівання розчину кислоти та зі збільшенням кількості повітря, що подається в апарат, вираженого через умовну швидкість [2], інтенсивність концентрування розчину кислоти збільшується (рис. 2,а та 2,б). Причому швидкість повітря, в даному випадку,

також суттєво впливає на процес концентрування. Із розрахунків виходить що, при концентруванні протягом двох годин, збільшення швидкості повітря з $1,0 \cdot 10^{-3}$ м/с до $10,0 \cdot 10^{-3}$ м/с призводить до зменшення масової частки води в кислоті з 0,356 до 0,216. Для досягнення приблизно такого ж результату необхідно підвищити температуру розчину кислоти, що визначає процес, майже вдвічі (рис. 2,а). Таким чином, кількість нейтрального газу, що подається в апарат є одним з параметрів, який дозволяє регулювати процес концентрування розчину сульфатної кислоти.

Температура нейтрального газу (в даному випадку повітря) дуже мало впливає на процес концентрування. Спостерігається лише тенденція до збільшення інтенсивності концентрування з підвищенням температури повітря з 20°C до 200°C (рис. 2,в). Це, ймовірно, пов'язано з тим, що в умовах нагрівання кислоти через стінку апарата в зазначеному діапазоні зміни температури повітря, процес концентрування слабо залежить від теплообміну між газовою та рідкою фазами. Процес повністю визначається підвищенням теплоти до розчину кислоти.

Розрахунки показують, що чим більшу концентрацію (меншу масову частку води в розчині) має початковий розчин кислоти, тим повільніше відбувається процес концентрування. Як виходить з рис. 2,г, під час концентрування впродовж 21600 с (6 годин) масова частка води у розчині кислоти для розчину з початковою масовою часткою 0,4 знижується більш ніж на 50%, для розчину кислоти з початковою масовою часткою води 0,2 – всього на 20%. Для досягнення більш низького вмісту води у розчині кислоти при переході до безперервного режиму процес концентрування необхідно здійснювати у декілька стадій.

Висновки

Розроблена математична модель процесу концентрування розчину сульфатної кислоти при випаровуванні у потік нейтрального газу в умовах нагрівання розчину через стінку апарата. Модель ґрунтується на запропонованих фізичних уявленнях про такий процес і математичному описі, який включає рівняння матеріального балансу, рівняння масовиддачі в газову фазу при випаровуванні, рівняння відносного вмісту компонентів розчину в газовій фазі, а також емпіричні рівняння, що отримані виходячи з раніш здійснених експериментальних досліджень. Результати досліджень, які отримані на підставі розробленої моделі, дозволили встано-

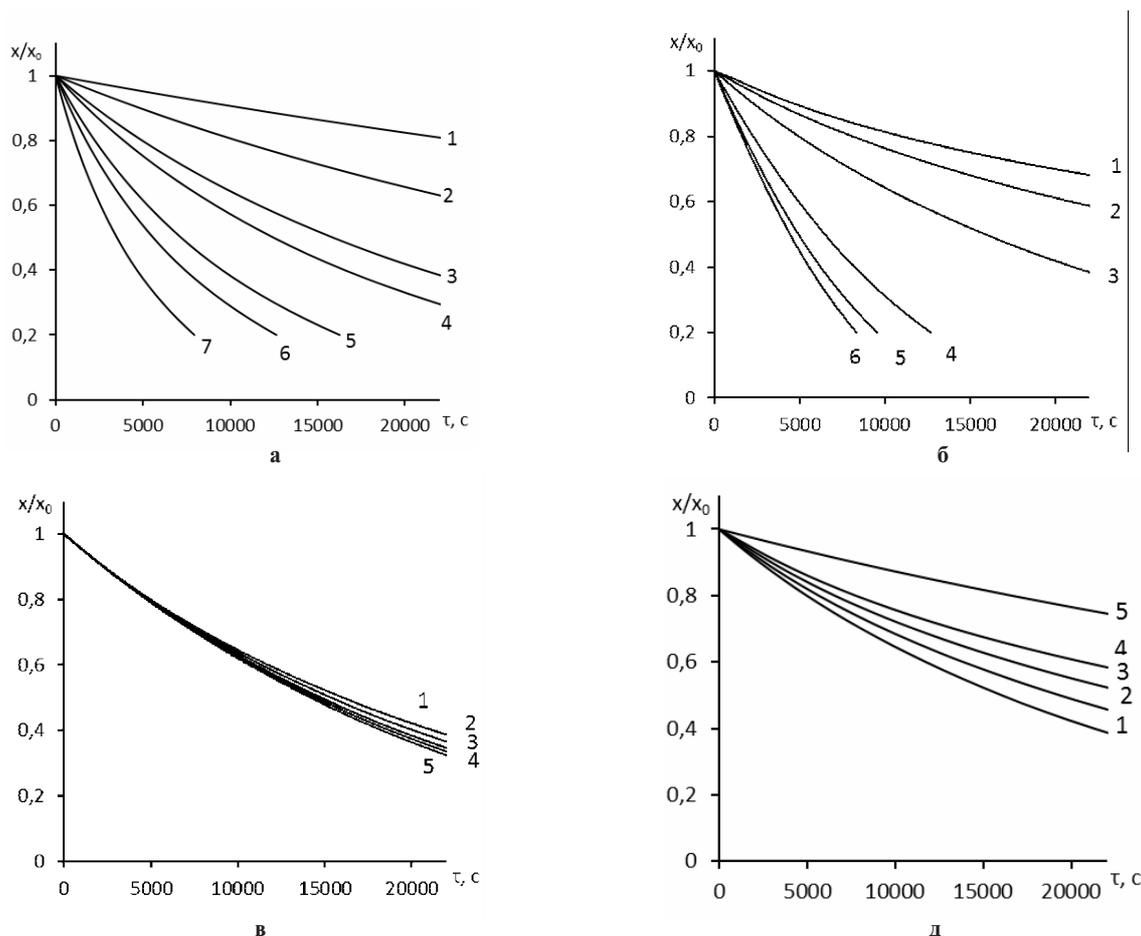


Рис. 2. Вплив параметрів процесу концентрування на зміну відносної масової частки води у розчині кислоти, що концентрується:

- а) температури розчину при $x_0=0,4$; $v=3,9 \cdot 10^{-3}$ м/с; $t_0=20^\circ\text{C}$
 (1 – $t_k=100^\circ\text{C}$; 2 – $t_k=120^\circ\text{C}$; 3 – $t_k=142^\circ\text{C}$; 4 – $t_k=150^\circ\text{C}$; 5 – $t_k=170^\circ\text{C}$; 6 – $t_k=180^\circ\text{C}$; 7 – $t_k=200^\circ\text{C}$);
- б) швидкості руху нейтрального газу при $t_k=142^\circ\text{C}$; $x_0=0,4$; $t_0=20^\circ\text{C}$
 (1 – $v=1,0 \cdot 10^{-3}$ м/с; 2 – $v=2,0 \cdot 10^{-3}$ м/с; 3 – $v=3,9 \cdot 10^{-3}$ м/с; 4 – $v=7,8 \cdot 10^{-3}$ м/с; 5 – $v=8,8 \cdot 10^{-3}$ м/с; 6 – $v=10 \cdot 10^{-3}$ м/с);
- с) температури нейтрального газу при $t_k=142^\circ\text{C}$; $x_0=0,4$; $v=3,9 \cdot 10^{-3}$ м/с;
 (1 – $t_0=20^\circ\text{C}$; 2 – $t_0=50^\circ\text{C}$; 3 – $t_0=100^\circ\text{C}$; 4 – $t_0=142^\circ\text{C}$; 5 – $t_0=200^\circ\text{C}$);
- д) початкової масової частки води у розчині кислоти при $t_k=142^\circ\text{C}$; $v=3,9 \cdot 10^{-3}$ м/с; $t_0=20^\circ\text{C}$
 (1 – $x_0=0,4$; 2 – $x_0=0,35$; 3 – $x_0=0,3$; 4 – $x_0=0,25$; 5 – $x_0=0,2$)

вити залежність зміни складу розчину кислоти під час концентрування від параметрів процесу. Отриманий алгоритм розрахунку процесу може бути використаний для визначення раціональних режимів концентрування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лебедев А.Я. Установки для денитрации и концентрирования серной кислоты. – М.: Химия, 1972. – 240 с.
2. Лукашев В.К., Романько С.Н., Тимофеев С.В. Исследование процесса концентрирования серной кислоты испарением в поток инертного газа // Химическая промышленность. – 2016. – Т.93. – № 2. – С.89-93.
3. Пат. 97392 Україна, МПК С01Б17/88 B01710-00 Спосіб концентрування сірчаної кислоти / В.К. Лукашов, С.М. Романько, С.В. Тимофіїв, А.М. Гудзовський – Заявл. 13.10.2014; Опубл. 10.03.2015. – Бюл. № 5.
4. Серафимов Л.А., Фролова А.В. Соблюдение первого закона Коновалова в процессе ректификации с инертным газом // Вестник МИТХТ. – 2008. – Т.3. – № 2. – С.45-52.
5. Rate of components evaporation from sulfuric acid solution during its concentrating in air flow / Lukashov V., Romanko S., Timofeev S., Protsenko A. // Chemistry and Chemical technology. – 2017. – Vol.11. – No. 3. – P.344-348.
6. Лукашев В.К., Романько С.Н., Тимофеев С.В. Массо-

перенос при концентрировании серной кислоты испарением в поток воздуха // Журнал инженерных наук. – 2016. – № 2. – С.В1-В7.

Надійшла до редакції 23.06.2017

SIMULATION OF THE PROCESS OF CONCENTRATING SULFURIC ACID SOLUTION BY EVAPORATION INTO A FLOW OF NEUTRAL GAS

V.K. Lukashov, S.M. Romanko, S.V. Timofeev

Shostka Institute of Sumy State University, Shostka, Ukraine

On the basis of the developed mathematical model, we studied the process of concentrating a solution of sulfuric acid by evaporation into a flow of neutral (i.e. inert) gas by heating the acid through the wall of the apparatus. Such a process allows performing the concentration at atmospheric pressure and temperature below the boiling point of the acid; as a result, low-temperature (100–200°C) heat carriers can be used. When developing the mathematical model, we assumed that (i) a solution of sulfuric acid is considered as a mixture of two components (H_2SO_4 monohydrate and water), which differ significantly in their volatility; (ii) there is no resistance of the liquid phase during evaporation, and (iii) the vapors of components quickly mix with a neutral gas. The mathematical description of the concentration process includes the equations of material balances for the solution as a whole and for water, the equation of mass transfer to the gaseous phase during evaporation, the equation for the relative content of sulfuric acid solution components in the gaseous phase, and some empirical equations obtained from previous experimental studies. As a result of the research, we established the changes in the composition of the acid at different parameters of the concentration process when using air as a neutral gas. The obtained algorithm for the simulation of the process can be successfully used to determine the rational modes of the sulfuric acid concentration.

Keywords: simulation; sulfuric acid; concentration; neutral gas; evaporation rate; mass transfer.

REFERENCES

1. Lebedev A.M., *Ustanovki dl'ya denitratsiyi i kontsentrirvaniya sernoi kisloty* [Equipment for denitration and concentrating of sulfuric acid]. Khimiya, Moscow, 1972. 240 p. (in Russian).
2. Lukashov V.K., Romanko S.N., Timofeev S.V. Issledovanie protsessa kontsentrirvaniya sernoi kisloty ispareniem v potok inertnogo gaza [Investigation of the process of sulfuric acid concentration by evaporation into an inert gas flow]. *Khimicheskaya Promyshlennost*, 2016, vol. 93, no. 2, pp. 89-93. (in Russian).
3. Lukashov V.K., Romanko S.M., Timofeev S.V., Gud-zovskiy A.M., *Sposib kontsentrivannya sirchanoyi kisloty* [A method for concentrating sulfuric acid]. Patent UA, no. 97392, 2015. (in Ukrainian).
4. Serafimov L.A., Sobludenie pervogo zakona Konovalova v protsesse rektifikatsii s inertnym gazom [Konovalov's first law validity during distillation with an inert gas]. *Vestnik MIT-KhT*, 2008, vol. 3, no. 2, pp. 45-52. (in Russian).
5. Lukashov V., Romanko S., Timofeev S., Protzenko A. Rate of components evaporation from sulfuric acid solution during its concentrating in air flow. *Chemistry & Chemical Technology*, 2017, vol. 11, no. 3, pp. 344-348.
6. Lukashov V.K., Romanko S.N., Timofeev S.V. Massopereenos pri kontsentrirvaniyi sernoi kisloty ispareniem v potok vozdukh [Mass transfer during sulfuric acid concentration by evaporation into the air flow]. *Journal of Engineering Sciences*, 2016, no. 2, pp. B1-B7. (in Russian).