

УДК 66.021.3+546.226-325

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ВИПАРЮВАННЯ РОЗЧИНІВ СУЛЬФАТНОЇ КИСЛОТИ З ПОНИЖЕНОЮ КОРОЗІЙНОЮ АКТИВНІСТЮ ФАЗ

В. Т. ЯВОРСЬКИЙ, А. Б. ГЕЛЕШ

Національний університет "Львівська політехніка"

Розглянуто умови тепло- і масообміну крапель сульфатної кислоти з газовим потоком. Розроблено математичну модель, яка дає змогу визначити головні параметри випарювання диспергованих розчинів сульфатної кислоти за безпосереднього їх контакту з гарячими газами.

Ключові слова: *сульфатна кислота, випарювання, математична модель.*

Формулювання задачі. У багатьох промислових виробництвах, які використовують сульфатну кислоту (H_2SO_4), одержують значні обсяги низькоконцентрованих її розчинів, які часто забруднені різними речовинами. Вибір методу утилізації цих розчинів зумовлений економічною доцільністю, яка залежить від їх концентрації та складу, а також вимог виробництв, у яких можна використовувати утилізований продукт [1].

Найпоширенішим методом концентрування викидних розчинів сульфатної кислоти є їхнє випарювання в установках з поверхневим теплообміном. Загальним недоліком цих установок є значна корозійна активність гарячих розчинів сульфатної кислоти, що ускладнює випарювання, ставить особливі вимоги до корозійної тривкості обладнання [2].

Встановлено, що найефективніше випарювати за безпосереднього контакту диспергованих розчинів сульфатної кислоти і гарячих газів [3]. Внаслідок інтенсифікації процесу та відсутності теплообмінних поверхонь, зменшується корозійний вплив сульфатної кислоти на апаратуру, спрощується конструкція випарних установок. Крім того, як теплоносії можна використовувати гарячі викидні гази, які утворюються у багатьох технологічних процесах, мають порівняно високу температуру та низький вологовміст [4]. Це дасть змогу значно здешевити випарювання та рекуперувати теплоту викидних технологічних газів.

Вищезазначене засвідчує актуальність задачі концентрування розчинів сульфатної кислоти за безпосереднього контакту з гарячими викидними газами.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Випарювання крапель рідини є класичною задачею теорії дисперсних систем. Цьому питанню присвячено велику кількість емпіричних і теоретичних досліджень, які систематизував і узагальнив у своїй монографії Фукс [5]. З практичної точки зору найбільший інтерес має процес випарювання крапель, які рухаються в газовому середовищі під дією сил тяжіння чи інерції. Проте, незважаючи на велику кількість публікацій, строгого математичного вирішення цієї задачі на сьогодні не існує, а наведені у працях [6–8] спроби наближеного розв'язку є адекватними тільки для окремих граничних чи часткових випадків випарювання. Розв'язати задачу в загальному вигляді можна лише числовими методами [5, 9], а для окремих випадків – експериментально [5, 10, 11].

Контактна особа: А. Б. ГЕЛЕШ, e-mail: gelesh75@gmail.com

В усіх зазначених працях розглядали випаровування крапель індивідуальних рідин (головно – води), які зберігають якісний та кількісний склад під час цього процесу, а властивості газової і рідкої фаз були функцією природи компонентів та температури. За випаровування крапель сульфатної кислоти її концентрація в часі змінюватиметься, тобто властивості рідкої фази також залежатимуть від змінного в часі кількісного складу краплі, що значно ускладнює математичний опис процесу.

Мета роботи – розробити математичну модель випаровування крапель сульфатної кислоти в газовому потоці, яка послужить підґрунтям для теоретичного розрахунку головних параметрів та характеристик процесу числовими математичними методами та використовуватиметься на практиці в технології концентрування розчинів сульфатної кислоти.

Для досягнення цієї мети необхідно вивести залежності, які дадуть змогу із достатньою точністю розрахувати масу, температуру, швидкість та положення краплі у будь-який момент часу.

Головні результати. Теоретичні положення, припущення та крайові умови. Можливість концентрування водних розчинів сульфатної кислоти випарюванням ґрунтується на тому, що до концентрації 98,3% H_2SO_4 співвідношення $H_2SO_4:H_2O$ у газовій фазі менше, ніж у рідині. Тому теоретично простим випарюванням концентрацію сульфатної кислоти можна підвищити до 98,3%.

На початку випарювання у газову фазу переходить тільки пара води, тому концентрація кислоти пропорційно зростає. Такий процес відбувається поки вміст H_2SO_4 у розчині не наблизиться до 80%. За подальшого нагрівання разом з водяною парою у газоподібний стан переходить і сульфатна кислота. Так, за атмосферного тиску температура кипіння 85%-ої сульфатної кислоти становить 500,1 К, а вміст H_2SO_4 у насиченій парі – 0,14%; для 95%-ої – 574,3 К і 40,8%; для 98%-ої – 605,4 К і 85,0%, відповідно. Крім того, під час випарювання сульфатної кислоти можливий її термічний розклад з подальшим утворенням дрібнодисперсного туману, вловлювання якого ускладнене. Помітний термічний розклад H_2SO_4 спостерігали лише за температур вище ніж 403 К. Так, ступінь термічного розкладу за температури 473 К становить 2,5%; за 573 К – 27,1%; за 673 К – 69,1% [1, 4]. Отже, розчини сульфатної кислоти доцільно випарювати за безпосереднього контакту гарячого газу і крапель сульфатної кислоти за температури, що не перевищує 403 К.

Максимальна температура розчину сульфатної кислоти, який випаровують за безпосереднього контакту з газом-теплоносієм, рівна температурі мокрого термометра та залежить від концентрації кислоти, температури газів та їхнього вологовмісту. Тому виконали відповідні розрахунки, які показали, що за безпосереднього контакту гарячих викидних газів (373...773 К) з сульфатною кислотою температура процесу (мокрого термометра) для 70% H_2SO_4 не перевищує 400 К, тобто в газову фазу з розчину переходить лише водяна пара, що знижує корозійний вплив газу на апаратуру. Кислота такої концентрації відповідає вимогам виробництв мінеральних добрив, зокрема амофосу.

Значну кількість викидної сульфатної кислоти одержують під час виробництва пігментного титану(IV) оксиду. Така кислота містить ~20% H_2SO_4 і проблема її повної утилізації на сьогодні не вирішена. Водночас, як показано вище, її концентрування до 70% за безпосереднього контакту з гарячими викидними газами не є технологічно складним. Нижче наведено результати теоретичного аналізу випарювання розчинів сульфатної кислоти, який включає математичну модель і розрахунок фізичних властивостей фаз залежно від температури повітря та концентрації кислоти.

Для розроблення наукових основ необхідно математично описати складні процеси тепло- і масовіддачі рухомої краплі, тому для спрощення розрахунків прийняли, що краплі мають сферичну форму і під час руху вони не деформуються і не пульсують; не зазнають вторинного подрібнення; шар водяної пари навколо краплі є насиченим, а її парціальний тиск визначається температурою краплі та концентрацією кислоти; температура в ядрі газового потоку і вміст водяної пари в ньому не змінюються; температура в об'ємі краплі однакова; передача теплоти між фазами відбувається внаслідок конвекції; крапля рухається вертикально зверху вниз.

Розрахунок маси та температури краплі. За безпосереднього контакту краплі сульфатної кислоти з газом-теплоносієм теплообмін супроводжується масообміном. Тому виконали теоретичний аналіз сумісного перебігу цих процесів.

Рівняння тепловіддачі від газової фази до краплі у загальному випадку можна записати так:

$$\Phi = \Phi' + \Phi'', \quad (1)$$

де Φ – тепловий потік від газового середовища до краплі кислоти, W; Φ' і Φ'' – частини потоку, які витрачаються на нагрівання і випаровування краплі, W.

Передача теплоти від газового середовища до краплі відбувається внаслідок теплової конвекції, яку визначають за рівнянням Ньютона–Ріхмана

$$\Phi = K \cdot f_2 \cdot \Delta T = K \cdot \pi \cdot d_2^2 \cdot (T_1 - T_2), \quad (2)$$

де K – коефіцієнт тепловіддачі, W/(m²·K); f_2 – поверхня теплообміну (поверхня краплі, $f_2 = \pi \cdot d_2^2$), m²; ΔT – різниця температур (рушійна сила теплообміну), K; T_1, T_2 – температури газу та краплі сульфатної кислоти, K; d_2 – діаметр краплі, m.

Коефіцієнт тепловіддачі характеризує інтенсивність теплообміну між поверхнею краплі та газом і залежить від значної кількості чинників. Оскільки ці залежності є складними і багатофакторними, то відсутній загальний формалізований підхід для теоретичного розрахунку величини K . Тому найточнішим методом його визначення є експеримент. Результати експериментів узагальнюють за допомогою теплової теорії подібності, згідно з якою не потрібно шукати залежність коефіцієнта від кожного окремого фактора, а достатньо лише визначити залежність між певними безрозмірними комплексами величин – критеріями подібності [12].

Загалом коефіцієнт K розраховують за формулою

$$K = \frac{\text{Nu} \cdot k_1}{d_2}, \quad (3)$$

де k_1 – коефіцієнт теплопровідності газу, W/(m·K); Nu – критерій Нуссельта, який є функцією чисел Рейнольдса (Re) та Прандтля (Pr) і для системи “крапля рідини–газова фаза” його можна розрахувати за рівнянням Ранца–Маршала [13]

$$\text{Nu} = 2 + 0,6 \cdot \text{Re}^{0,5} \cdot \text{Pr}^{0,33}.$$

Числа Рейнольдса та Прандтля розраховують за формулами

$$\text{Re} = \frac{d_2 \cdot \rho_1 \cdot u}{\mu_1} \quad \text{та} \quad \text{Pr} = \frac{\mu_1 \cdot c_1}{k_1},$$

де ρ_1 – густина газового середовища, kg/m³; u – швидкість краплі відносно газу (за протитечійного руху $u = v_1 + v_2$), v_1, v_2 – швидкості газу і краплі, m/s; μ_1 – коефіцієнт динамічної в'язкості газу, Pa·s; c_1 – питома теплоємність газу, J/(kg·K).

Частина одержаної краплею теплоти витрачається на її нагрівання. Цю теплоту можна визначати за таким рівнянням:

$$\Phi' = m_2 \cdot c_2 \cdot \frac{\Delta T_2}{\Delta \tau}, \quad (4)$$

де m_2 – маса краплі, kg; c_2 – питома теплоємність розчину сульфатної кислоти, J/(kg·K); ΔT_2 – зміна температури краплі, K; $\Delta \tau$ – інтервал часу, s [12].

Решта теплоти витрачається на випаровування води з розчину H_2SO_4

$$\Phi'' = r_3 \cdot I, \quad (5)$$

де r_3 – питома теплота пароутворення води, J/kg; I – потік маси (швидкість випаровування), kg/s.

Швидкість випаровування розраховують за формулою

$$I = \frac{\Delta m_2}{\Delta \tau} = \varphi \cdot f_2, \quad (6)$$

де φ – густина дифузійного потоку маси, kg/(s·m²).

Під час випаровування крапель кислоти утворена водяна пара внаслідок дифузії переходить у газову фазу і одночасно відбувається тепловіддача від газу до поверхні краплі. Тому, аналогічно до тепловіддачі, конвективний масообмін між газом і краплею називають масовіддачею [8, 12]. Її інтенсивність визначають коефіцієнтом масовіддачі, а густину потоку маси можна розрахувати за формулою

$$\varphi = K_D \cdot \Delta C_3 = K_D \cdot (C_{30} - C_{3\infty}), \quad (7)$$

де K_D – коефіцієнт масовіддачі (коефіцієнт масової дифузії), m/s; ΔC_3 – різниця концентрацій водяної пари (рушійна сила процесу), kg/m³; C_{30} , $C_{3\infty}$ – концентрації водяної пари на поверхні краплі та на нескінченному віддаленні від неї (в ядрі потоку), kg/m³.

Якщо прийняти, що водяна пара підпорядковується законам ідеальних газів та скористатись рівнянням стану ідеального газу $\left(C_3 = \frac{M_3 \cdot p_3}{R \cdot T_3} \right)$, то рушійну силу процесу доцільно виразити через парціальні тиски

$$\Delta C_3 = \frac{M_3}{R} \cdot \left(\frac{p_{30}}{T_{30}} - \frac{p_{3\infty}}{T_{3\infty}} \right) = \frac{M_3}{R} \cdot \left(\frac{p_{30}}{T_2} - \frac{p_{3\infty}}{T_1} \right), \quad (8)$$

де M_3 – молекулярна маса води, $M_3 = 0,018$ kg/mol; R – універсальна газова стала, $R = 8,314$ J/(mol·K); p_{30} та $p_{3\infty}$ – парціальні тиски водяної пари на поверхні краплі та в ядрі газового потоку, Pa; T_{30} та $T_{3\infty}$ – температури поверхні краплі та ядра газового потоку, K.

Підставляючи залежності (6)–(8) в рівняння (5), одержуємо:

$$\Phi'' = r_3 \cdot \pi \cdot d_2^2 \cdot K_D \cdot \frac{M_3}{R} \cdot \left(\frac{p_{30}}{T_2} - \frac{p_{3\infty}}{T_1} \right). \quad (9)$$

За аналогією до процесів теплообміну (3) коефіцієнт масовіддачі K_D розраховують за формулою

$$K_D = \frac{Sh \cdot D}{d_2},$$

де D – коефіцієнт дифузії в газовій суміші водяна пара–повітря, m²/s; Sh – критерій Шервуда [5, 9].

Коефіцієнт дифузії визначають за такою формулою:

$$D = D_0 \cdot \left(\frac{101325}{P_1} \right) \cdot \left(\frac{T_1}{273} \right)^{1,5},$$

де D_0 – коефіцієнт дифузії за нормальних умов, m^2/s ; P_1 – тиск газу, Па [13].

Критерій Шервуда є функцією чисел Рейнольдса (Re) та Шмідта (Sc) і для системи “крапля рідини–газова фаза” його можна розрахувати за рівнянням Манінга [14]

$$\text{Sh} = 2 + 0,6 \cdot \text{Re}^{0,5} \cdot \text{Sc}^{0,33}.$$

Число Шмідта розраховують за формулою

$$\text{Sc} = \frac{\mu_1}{D \cdot \rho_1}.$$

З рівняння балансу теплових потоків (1), формул (4) та (9) можна розрахувати зміну температури краплі за певний проміжок часу

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta \tau} = \frac{\Phi - \Phi''}{m_2 \cdot c_2}, \quad (10)$$

а також за рівняннями (5) та (9) – зміну маси краплі (швидкість випаровування)

$$\frac{\Delta m_2}{\Delta \tau} = \frac{\Phi''}{r_3}. \quad (11)$$

Розрахунок швидкості краплі та її переміщення. Швидкість руху краплі можна розрахувати, виходячи з балансу сил, які діють на краплю. Опираючись на другий закон Ньютона, результуючу сил, які діють на краплю (F_2), можна записати так:

$$\vec{F}_2 = \vec{G} + \vec{A} + \vec{R}, \quad (12)$$

де \vec{G} , \vec{A} та \vec{R} – сили тяжіння, Архімеда та опору середовища, відповідно, N.

Сила тяжіння, що змушує краплю рухатися вниз, та сила Архімеда направлені протилежно. Різниця цих сил є такою:

$$V_2 \cdot g \cdot \rho_2 - V_2 \cdot g \cdot \rho_1 = \frac{\pi \cdot d_2^3}{6} \cdot g \cdot (\rho_2 - \rho_1), \quad (13)$$

де V_2 – об'єм краплі, m^3 ; g – прискорення вільного падіння, m/s^2 .

Сила опору середовища становить

$$R = \xi \cdot S \cdot \frac{\rho_1 \cdot u^2}{2} = \xi \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \cdot \frac{\rho_1 \cdot u^2}{2}, \quad (14)$$

де S – площа проекції тіла на площину, перпендикулярну до напрямку його руху, m^2 ; ξ – коефіцієнт опору середовища [15].

Результуючу силу можна виразити через масу краплі і її прискорення (a_2 , m/s^2)

$$F_2 = m_2 \cdot a_2 = \frac{\pi \cdot d_2^3}{6} \cdot \rho_2 \cdot a_2. \quad (15)$$

Підставивши у формулу (12) значення з формул (13)–(15), одержуємо:

$$\frac{\pi \cdot d_2^3}{6} \cdot \rho_2 \cdot a_2 = \frac{\pi \cdot d_2^3}{6} \cdot g \cdot (\rho_2 - \rho_1) - \xi \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \cdot \frac{\rho_1 \cdot u^2}{2}.$$

Після перетворень і спрощень одержуємо рівняння для розрахунку прискорення

$$a_2 = g \cdot \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) - \xi \cdot \frac{3 \cdot \rho_1 \cdot u^2}{4 \cdot \rho_2 \cdot d_2}. \quad (16)$$

Для кожного з гідродинамічних режимів руху: ламінарного ($Re < 2$), перехідного ($2 < Re < 500$) та автономного ($500 < Re < 2 \cdot 10^5$), залежність $\xi = f(Re)$ описують відповідними рівняннями. Під час руху краплі значення Re змінюватимуться, тому використали узагальнене рівняння

$$\xi = \left(\frac{16}{Re} + \frac{2,2}{\sqrt{Re}} + 0,32 \right) \cdot \left(\frac{1,5 \cdot \mu_2 + \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \right),$$

де μ_2 – динамічна в'язкість кислоти, Pa·s [9].

Використовуючи рівняння (16), можна розрахувати зміну швидкості краплі в часі

$$\frac{\Delta v_2}{\Delta \tau} = a_2 = g \cdot \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) - \xi \cdot \frac{3 \cdot \rho_1 \cdot u^2}{4 \cdot \rho_2 \cdot d_2}, \quad (17)$$

а також її переміщення

$$\Delta r_2 = v_2 \cdot \Delta \tau. \quad (18)$$

Отже, задавши початкові координати, швидкість краплі, її розміри, концентрацію, температуру та інтервал часу $\Delta \tau$, можна за рівняннями (10), (11) та (17), (18) розрахувати температуру, масу (концентрацію), швидкість та координати краплі у будь-який момент часу.

Розрахунок фізичних властивостей фаз. Для можливості використання числових методів розрахунку великі масиви значень фізичних величин апроксимують, тобто замінюють функціями, які з достатньою точністю їх відтворюють. Залежності $k_1, \mu_1, c_1, \rho_1 = f(T)$ та $\mu_2, c_2, \rho_2, p_3 = f(T, C_2)$, де C_2 – концентрація кислоти, вивели, використовуючи метод найменших квадратів з апроксимацією значень функцій степеневими поліномами. У складних випадках використовували методи заміни перемінних та лінеаризації функцій. Значення фізичних величин брали з довідника [2]. Для розрахованих значень фізичних величин обчислили відносні похибки. Одержані залежності та максимальні похибки розрахунків наведено в табл. 1, 2.

Таблиця 1. Рівняння розрахунку залежності фізичних властивостей повітря від температури

Рівняння	Інтервал змінних	Відносна похибка
Густина, kg/m ³		
$\rho_1 = -7,478 \cdot 10^{-9} \cdot t_1^3 + 8,914 \cdot 10^{-6} \cdot t_1^2 - 4,279 \cdot 10^{-3} \cdot t_1 + 1,2971$	$293 \leq T_1 \leq 773 \text{ K}$	$\leq 2,0\%$
В'язкість, Pa·s		
$\mu_1 = -1,88 \cdot 10^{-11} \cdot t_1^2 + 4,69 \cdot 10^{-8} \cdot t_1 + 1,735 \cdot 10^{-5}$	$293 \leq T_1 \leq 773 \text{ K}$	$\leq 1,0\%$
Теплоємність, J/(kg·K)		
$c_1 = 2,638 \cdot 10^{-4} \cdot t_1^2 + 5,65 \cdot 10^{-2} \cdot t_1 + 1003,20$	$293 \leq T_1 \leq 773 \text{ K}$	$\leq 0,2\%$
Теплопровідність, W/(m·K)		
$k_1 = -2,68 \cdot 10^{-8} \cdot t_1^2 + 8,05 \cdot 10^{-5} \cdot t_1 + 0,02423$	$353 \leq T_2 \leq 773 \text{ K}$	$\leq 0,7\%$

* $t_1 = T_1 - 273$.

Таблиця 2. Рівняння розрахунку залежності фізичних властивостей розчинів сульфатної кислоти від температури та концентрації

Рівняння	Інтервал змінних	Відносна похибка
Густина, kg/m ³		
$\rho_2 = -(-7,9659 \cdot 10^{-11} \cdot C_2^6 + 2,32288 \cdot 10^{-8} \cdot C_2^5 - 2,71135 \cdot 10^{-6} \cdot C_2^4 + 1,64608 \cdot 10^{-4} \cdot C_2^3 - 5,5755 \cdot 10^{-3} \cdot C_2^2 + 10,4943 \cdot 10^{-2} \cdot C_2 - 0,1914) \cdot t_2^* + (-9,2103 \cdot 10^{-7} \cdot C_2^5 + 2,16612 \cdot 10^{-4} \cdot C_2^4 - 1,91206 \cdot 10^{-2} \cdot C_2^3 + 0,8269 \cdot C_2^2 - 9,225 \cdot C_2^{**} + 1127,89)$	$293 \leq T_2 \leq 403 \text{ K},$ $20 \leq C_2 \leq 70\%$	$\leq 0,5\%$
В'язкість, Pa·s		
$\mu_2 = (-1,3456129 \cdot 10^{-8} \cdot C_2^6 + 3,902094 \cdot 10^{-6} \cdot C_2^5 - 4,4770622 \cdot 10^{-4} \cdot C_2^4 + 2,6116373 \cdot 10^{-2} \cdot C_2^3 - 0,8156303 \cdot C_2^2 + 12,99971 \cdot C_2 - 80,4225) \times \exp(-1,822 \cdot 10^{-12} \cdot C_2^6 - 7,68 \cdot 10^{-10} \cdot C_2^5 + 1,2113 \cdot 10^{-7} \cdot C_2^4 - 9,216 \cdot 10^{-6} \cdot C_2^3 + 3,587 \cdot 10^{-4} \cdot C_2^2 - 6,7627 \cdot 10^{-3} \cdot C_2 + 6,708 \cdot 10^{-2}) \cdot t_2) / 1000$	$293 \leq T_2 \leq 403 \text{ K},$ $20 \leq C_2 \leq 70\%$	$\leq 6,0\%$
Теплоємність, J/(kg·K)		
$c_2 = 4441,25 \cdot \exp(-0,0112 \cdot C_2)$	$20 \leq C_2 \leq 70\%$	$\leq 1,1\%$
Парціальний тиск водяної пари над розчинами H ₂ SO ₄ , Pa		
$p_3 = -(-6,633285 \cdot 10^{-8} \cdot t_2^6 + 2,2501685 \cdot 10^{-5} \cdot t_2^5 - 3,0330815 \cdot 10^{-3} \cdot t_2^4 + 0,20847274 \cdot t_2^3 - 7,565348 \cdot t_2^2 + 139,8239 \cdot t_2 - 984,423) \cdot C_2 + (0,2002151 \cdot t_2^3 - 13,96787 \cdot t_2^2 + 5,90498 \cdot 10^2 \cdot t_2 - 5177,2)$	$20 \leq C_2 < 40\%,$ $293 \leq T_2 \leq 363 \text{ K}$	$\leq 5,0\%$
$p_3 = -(4,015276 \cdot 10^{-8} \cdot t_2^6 - 1,373702 \cdot 10^{-5} \cdot t_2^5 - 1,894905 \cdot 10^{-3} \cdot t_2^4 - 0,13044797 \cdot t_2^3 + 4,839852 \cdot t_2^2 - 87,6216 \cdot t_2 + 644,64) \cdot C_2 + (2,5382418 \cdot 10^{-3} \cdot t_2^4 - 0,27351657 \cdot t_2^3 + 21,063365 \cdot t_2^2 - 476,0477 \cdot t_2 + 6059,15)$	$40 \leq C_2 < 60\%,$ $313 \leq T_2 \leq 363 \text{ K}$	$\leq 4,0\%$
$p_3 = (8,557036059 \cdot 10^{-4} \cdot t_2^6 - 0,33209839985 \cdot t_2^5 + 50,215854648 \cdot t_2^4 - 3767,983445 \cdot t_2^3 + 148922,83573 \cdot t_2^2 - 2903440,604 \cdot t_2 + 22279053,9) \times \exp(-1,1236 \cdot 10^{-12} \cdot t_2^6 - 4,2967 \cdot 10^{-10} \cdot t_2^5 + 6,5035 \cdot 10^{-8} \cdot t_2^4 - 5,0641 \cdot 10^{-6} \cdot t_2^3 + 2,1932 \cdot 10^{-4} \cdot t_2^2 - 0,5318 \cdot 10^{-2} \cdot t_2 + 0,1722) \cdot C_2$	$60 \leq C_2 \leq 70\%,$ $323 \leq T_2 \leq 393 \text{ K}$	$\leq 3,0\%$

* $t_2 = T_2 - 273$, ** C_2 – концентрація кислоти, %.

В інтервалі температур 293...773 К залежність густини повітря від температури описують поліномом третього степеня, а в'язкість, теплоємність та теплопровідність – поліномами другого степеня, відносна похибка розрахунків не перевищує 2%. Властивості розчинів сульфатної кислоти, крім теплоємності, обумовлені температурою та концентрацією H₂SO₄, тому залежності є складнішими. Так, залежність густини кислоти від температури є лінійною, а від концентрації – описується поліномом шостого степеня. Для математичного опису залежності парціального тиску водяної пари від температури та концентрації кислоти, досліджуваний інтервал параметрів (t_2 , C_2) розбили на три частини та описали за допомогою поліномних, лінійних та експоненціальних функцій.

Одержані рівняння дають змогу з достатньою точністю (відносна похибка розрахунків не перевищує 6%) розрахувати необхідні властивості повітря і суль-

фатної кислоти та можуть бути використані для розрахунку випарювання крапель сульфатної кислоти за допомогою розробленої математичної моделі.

ВИСНОВКИ

Розроблена математична модель дає змогу теоретично визначити головні параметри випарювання розчинів H_2SO_4 за безпосереднього контакту диспергованих розчинів сульфатної кислоти і гарячих газів. Результати теоретичних і експериментальних досліджень дають змогу мінімізувати корозійний вплив сульфатної кислоти на обладнання, обрати технологічно доцільний режим роботи випарної установки та спроектувати ефективний основний апарат.

РЕЗЮМЕ. Рассмотрены условия тепло- и массообмена капель серной кислоты с газовым потоком. Разработана математическая модель, позволяющая определить основные параметры выпаривания диспергированных растворов серной кислоты при их непосредственном контакте с горячими газами.

SUMMARY. Conditions of heat- and mass-transfer of sulphide acid drops with gas flow are considered. A mathematical model that gives an opportunity to determine main parameters of evaporation process of sulfate acid dispersed solutions after their direct contact with hot gases is worked out.

1. *Яворський В. Т.* Технологія сірки і сульфатної кислоти. – Львів: Вид-во Національного ун-ту “Львівська політехніка”, 2010. – 404 с.
2. *Малин К. М.* Справочник сернокислотчика. – М.: Химия, 1971. – 744 с.
3. *Калимон Я. А., Гелеш А. Б., Яворський О. Є.* Дослідження процесу упарювання розчинів сульфатної кислоти у порожнистій розпилюючій колоні // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2014. – № 4. – С. 64–71.
4. *Kalyton Y. A., Helesh A. B., and Yavorskyi O. Y.* Hydrolytic sulphate acid evaporation by waste gases from burning furnaces of meta-titanic acid paste // Chemistry & Chemical Technology. – 2012. – № 6 (4). – P. 423–429.
5. *Фукс Н. А.* Испарение и рост капель в газообразной среде. – М.: Академии наук СССР, 1958. – 94 с.
6. *Лушников А. А., Загайнов В. А., Нужный В. М.* Расчет скорости испарения капель воды и сопоставление с экспериментом // Физика аэродисперсных систем. – 2001. – № 38. – С. 7–17.
7. *Козырев А. В., Ситников А. Г.* Испарение сферической капли в газе среднего давления // Успехи физических наук. – 2001. – 171, № 7. – С. 765–774.
8. *Емельянов А. Л., Платунов Е. С.* Кинетика испарения капель в системах охлаждения теплонагруженных элементов приборов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – 54, № 1. – С. 84–88.
9. *Дикий М. О., Соломаха А. С., Петренко В. Г.* Математичне моделювання випарювання крапель води в повітряному потоці // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – 3, № 10 (63). – С. 17–20.
10. *Селиванов С. Е., Кулик М. И.* Кинетика испарения капель жидких топлив // Вестник ХНАДУ. – 2011. – № 52. – С. 105–109.
11. *Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.* Влияние твердых включений в каплях жидкости на характеристики их испарения при движении через высокотемпературную газовую среду // Ж. техн. физики. – 2014. – 84, № 12. – С. 33–37.
12. *Касаткин А. Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Госхимиздат, 1961. – 830 с.
13. *Швыдкий В. С., Ладыгичев М. Г.* Очистка газов: справ. изд. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 640 с.
14. *Пажжи Д. Г., Галустанов В. С.* Основы техники распыливания жидкостей. – М.: Химия, 1984. – 256 с.
15. *Процеси та апарати хімічних технологій: навч. пос. / Я. М. Ханік, А. І. Дубинін, В. М. Атаманюк, О. В. Станіславчук.* – Львів: Вид-во Національного ун-ту “Львівська політехніка”, 2005. – 192 с.

Одержано 01.07.2015