

**Калимон Я.А.,** докт. техн. наук, проф., **Гелеш А.Б.,** канд. техн. наук,  
**Яворський О.Є.,** аспірант

**Національний університет «Львівська політехніка»**

вул. С. Бандери 12, 79013 Львів, Україна, e-mail: kalymon@polynet.lviv.ua

## Дослідження процесу упарювання розчинів сульфатної кислоти у порожнистій розпилюючій колоні

Проаналізовано процес упарювання розчинів сульфатної кислоти у порожнистій розпилюючій колоні. На основі матеріально-теплових розрахунків та літературних джерел розраховані коефіцієнти тепловіддачі від гарячого повітря до крапель кислоти різної концентрації, тривалість прогрівання та упарювання крапель. На основі експериментальних даних, які одержано на укрупненій лабораторній установці, встановлено залежності коефіцієнта тепловіддачі від радіуса краплі, концентрації кислоти та часу контактування «крапля – газова фаза». Експериментально встановлено, що значення коефіцієнта тепловіддачі в досліджуваній системі у 10–100 разів більше у порівнянні зі значеннями, розрахованими за математичними моделями. Обґрунтовано, що розчини сульфатної кислоти доцільно диспергувати до крапель діаметром 1–2 мм. Отримані результати запропоновано використовувати для розрахунку випарного апарата та розроблення технології утилізації відхідних розчинів сульфатної кислоти. *Бібл. 8, рис. 4, табл. 1.*

**Ключевые слова:** викидні гази, сульфатна кислота, коефіцієнт тепловіддачі.

### Постановка задачі

Сульфатну кислоту у значних обсягах використовують як сушильний агент, у процесах органічного синтезу, для виробництва пігментного титану (IV) оксиду тощо. При тому витрачається зовсім незначна кількість сульфатної кислоти; в основному її виводять з процесу у розведеному стані та забруднену домішками. Таку кислоту, як правило, очищають від домішок та концентрують, або постачають іншим споживачам.

Концентрування розчинів сульфатної кислоти до стандарту (92–96 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) є складним, енергоємним технологічним процесом. Тому їх здебільшого упарюють до невисоких концентрацій (55–75 %) та використовують на таких виробництвах, як, наприклад, виробництво амофосу, суперфосфату тощо. Крім того, традиційно для упарення сульфатної кислоти, як енергоносії, використовують природний газ, вартість якого постійно зростає. Альтернативою природному газу можуть стати гарячі викидні гази охолодження твердих речовин, наприклад, пігментного титану (IV) оксиду після печей прожарювання, металургійної та хімічної промисловості, виробництва будівельних матеріалів тощо. Такі гази, здебільшого мають порівняно високу температуру (до 573–623 К) та низький вологовміст. Тому, враховуючи вищезазначене, актуальність упарювання розчинів

сульфатної кислоти гарячими газами не викликає сумнівів.

### Аналіз публікацій

Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що для упарювання розчинів сульфатної кислоти доцільно використовувати порожнисту вертикальну розпилюючу колону при безпосередньому контакті газу з рідиною [1, 2]. Кінетика випарювання крапель води та інших речовин вивчалася багатьма авторами. У більшості випадків у цих публікаціях розглядають процеси «крапля – газова фаза» за невеликих (5–20 К) [3], або великих (до 1000 К) [4] різниць температур між ними. Кінетичні константи, розраховані за математичними моделями, дуже різняться між собою. У зв'язку з цим існує необхідність детальнішого вивчення процесу упарювання крапель розчинів сульфатної кислоти у порожнистій колоні гарячими газами.

Мета роботи – дослідження та визначення кінетичних констант процесу упарювання крапель розчинів сульфатної кислоти у порожнистій колоні.

### Викладення головних результатів

**Теоретична частина.** Більшість методів розрахунку процесів тепло- та масообміну ґрунтуються на швидкості випаровування окремої краплі. Розрахунки здійснюють за таких

припущень: крапля має сферичну форму; шар пари біля поверхні краплі є насиченим; розраховуючи середній діаметр краплі, полідисперсний потік крапель замінюють монодисперсним; краплі не деформуються, не зливаються та не зазнають вторинного подрібнення; після досягнення термодинамічної рівноваги температура крапель залишається постійною, рівною температурі мокрого термометра.

Розглянемо ситуацію уярювання розчину сульфатної кислоти у порожнистій колоні. Крапля розчину сульфатної кислоти з початковою температурою  $t_{k(0)}$  попадає у повітряне середовище з температурою  $t_c$ . Температура  $t_c$  та відносна вологість середовища  $\phi_c$  залишаються постійними. При тому  $t_c > t_{k(0)}$ , а  $\phi_c$  менше від насичення.

Під час вільного падіння краплі мають місце такі процеси.

1. Передача теплоти від газового середовища до краплі ( $Q_{T(\tau)}$ ), яка описується рівнянням теплової конвекції

$$Q_{T(\tau)} = \alpha_T \cdot 4 \pi r_{(\tau)}^2 (t_c - t_{k(\tau)}). \quad (1)$$

2. Одержана краплею теплота витрачається на нагрівання краплі ( $Q_{H(\tau)}$ ) до температури мокрого термометра та на випаровування води ( $Q_{B(\tau)}$ ). Ці величини можна визначити за такими рівняннями:

$$Q_{H(\tau)} = (c \rho \cdot 4 \pi r_{(\tau)}^3 / 3) \cdot dt_k / d\tau; \quad (2)$$

$$Q_{B(\tau)} = q_B \alpha_M \cdot 4 \pi r_{(\tau)}^2 \cdot (d_{k(\tau)} - d_c), \quad (3)$$

де  $\alpha_T$  — коефіцієнт тепловіддачі від повітряного середовища до краплі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $c$  — питома теплоємність рідини, Дж/(кг·К);  $\rho$  — густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;  $r_{(\tau)}$  — радіус краплі, м;  $d_c$ ,  $d_{k(\tau)}$  — вологовміст повітряного середовища на межі з краплею та у ядрі повітряного середовища, кг/кг;  $q_B$  — теплота випаровування води з сульфатної кислоти з урахуванням теплоти дегідратації, Дж/кг;  $\alpha_M$  — коефіцієнт масовіддачі з поверхні краплі у повітряне середовище, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Рівняння теплового балансу системи «крапля — середовище» у загальному випадку є таким:

$$Q_{T(\tau)} = Q_{H(\tau)} + Q_{B(\tau)}. \quad (4)$$

Об'єднавши рівняння (1)–(4) та зробивши певні математичні перетворення, отримаємо таке диференціальне рівняння для теплових потоків:

$$(c \rho r_{(\tau)} / 3) (dt_k / d\tau) + q_B \alpha_M (d_{k(\tau)} - d_c) - \alpha_T (t_c - t_{k(\tau)}) = 0. \quad (5)$$

У початковий момент випаровування вологовміст повітряного середовища на межі з краплею та в ядрі потоку практично рівні, мають невеликі абсолютні значення  $d_{k(\tau)} \approx d_c$ . Тоді

$$(c \rho r_{(\tau)} / 3) (dt_k / d\tau) = \alpha_T (t_c - t_{k(\tau)}). \quad (6)$$

На основній стадії процесу, тобто після досягнення краплею температури мокрого термометра, встановлюється стаціонарний режим упарювання. Тоді рівняння теплового балансу можна записати так:

$$q_B \alpha_M (d_{H(t_{M,T})} - d_c) = \alpha_T (t_c - t_{M,T}), \quad (7)$$

де  $d_{H(t_{M,T})}$  — вологовміст насиченого повітря при температурі мокрого термометра  $t_{M,T}$ .

Рівняння (7) запишемо у такому вигляді:

$$(t_c - t_{M,T}) / (d_{H(t_{M,T})} - d_c) = q_B \alpha_M / \alpha_T. \quad (8)$$

Достовірність виразу (8) підтверджена експериментально для випаровування крапель води [3]. Так, в області температур 293–353 К справджується співвідношення

$$(t_c - t_{M,T}) / (d_{H(t_{M,T})} - d_c) = q_B \cdot \alpha_M / \alpha_T = 2,5 \cdot 10^3 \text{ К}. \quad (9)$$

Час прогріву краплі розчину сульфатної кислоти ( $\tau_{пр}$ ) від  $t_{k(0)}$  до  $t_{M,T}$  наближено розраховуємо за рівнянням (6), прийнявши, що випаровування води з краплі у цей момент відсутнє і радіус краплі є незмінним. Рівняння (6) запишемо у вигляді

$$\int_{t_{k(0)}}^{t_{M,T}} c \rho r_0 \cdot dt_k = \int_0^{\tau} 3 \alpha_T (t_c - t_{M,T}) d\tau. \quad (10)$$

Після інтегрування отримаємо

$$\tau_{пр} = [c \rho r_0 (t_{M,T} - t_{k(0)})] / [3 \alpha_T (t_c - t_{M,T})]. \quad (11)$$

Навколо краплі, яка вільно рухається з великою швидкістю у повітряному потоці, утворюється сферичний ламінарний приграничний шар, коефіцієнт тепловіддачі якого визначимо за таким рівнянням [3]:

$$\alpha_T = \lambda_{II} / r_0, \quad (12)$$

де  $\lambda_{II}$  — коефіцієнт теплопровідності газу у ламінарному пограничному шарі, Дж/(м·с·К).

Враховуючи те, що значення теплопровідності повітря та пари близькі, після підстановки рівняння (12) у (11) отримаємо

$$\tau_{\text{пр}} = [c \rho \rho_0^2 (t_{\text{м.т}} - t_{\text{к(0)}})] / [3 \lambda_{\text{п}} (t_{\text{с}} - t_{\text{м.т}})]. \quad (13)$$

Під час випаровування зміна маси краплі підпорядковується такому рівнянню [3]:

$$dM / d\tau = -4 \pi r_{(\tau)}^2 (dr/d\tau). \quad (14)$$

Цей потік маси у вигляді водяної пари вноситься з поверхні краплі у повітряне середовище. Його можна визначити, використавши закон Фіка:

$$dM/d\tau = \alpha_{\text{м}} \cdot 4 \pi r_{(\tau)}^2 (d_{\text{к(т)}} - d_{\text{с}}). \quad (15)$$

Співвідношення (14) та (15) можна виразити диференціальним рівнянням, яке визначає перенесення маси з краплі у середовище:

$$c (dr/d\tau) + \alpha_{\text{м}} (d_{\text{к(т)}} - d_{\text{с}}) = 0. \quad (16)$$

Упарювання розчину сульфатної кислоти відбувається із зменшенням радіуса краплі від  $r_0$  до  $r$ . При тому концентрація кислоти та густина розчину дещо зростають, а  $d_{\text{к(т)}}$  дещо зменшується. Прийнемо, що  $\rho$  та  $d_{\text{к(с)}}$  за час вільного падіння краплі у колоні змінюються незначно, тобто залишаються постійними. Підставивши рівняння (8) та (12) у (16), отримуємо

$$\int_{r_0}^r \rho r d\tau = \int_0^{t_{\text{вип}}} [(\lambda_{\text{п}}/q_{\text{в}}) \cdot (t_{\text{с}} - t_{\text{м.т}})] d\tau. \quad (17)$$

Після інтегрування одержимо

$$\tau_{\text{вип}} = [q_{\text{в}} \rho (r_0^2 - r^2)] / [2 \lambda_{\text{п}} (t_{\text{с}} - t_{\text{м.т}})]. \quad (18)$$

### Залежність коефіцієнта тепловіддачі від концентрації сульфатної кислоти та розміру крапель

Концентрація H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , % (мас.)		Радіус краплі, × 10 <sup>3</sup> , м	Показники, розраховані за формулами (1)–(18)			Коефіцієнт тепловіддачі, розрахований за [3], Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
вхід	вихід		час прогріву краплі, с	час випаровування, с	коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	
26,0	27,0	1	6,63	4,80	26,0	29,5
26,0	29,0	1	6,57	13,67	25,3	29,5
34,0	35,0	1	6,95	4,09	25,8	29,7
34,0	37,0	1	6,88	11,82	24,7	29,7
44,0	45,0	1	7,42	3,61	25,6	30,1
44,0	47,0	1	7,33	10,54	24,2	30,1
58,0	59,0	1	9,68	3,30	25,8	31,4
58,0	61,0	1	9,57	9,74	24,0	31,4
70,0	71,0	1	13,47	3,24	25,9	33,3
70,0	73,0	1	13,47	9,71	24,1	33,3
26,0	27,0	2	26,52	19,19	13,0	14,7
26,0	29,0	2	26,26	54,70	12,7	14,7
34,0	35,0	2	27,80	16,36	12,9	14,9
34,0	37,0	2	27,50	47,28	12,4	14,9
44,0	45,0	2	29,70	14,44	12,8	15,1
44,0	47,0	2	29,33	42,17	12,1	15,1
58,0	59,0	2	38,72	13,19	12,9	15,7
58,0	61,0	2	38,30	38,98	12,0	15,7
70,0	71,0	2	53,87	12,98	13,0	16,6
70,0	73,0	2	53,87	38,85	12,0	16,6
26,0	27,0	2,65	46,56	33,69	9,8	11,1
26,0	29,0	2,65	46,10	96,03	9,6	11,1
34,0	35,0	2,65	48,81	28,73	9,7	11,2
34,0	37,0	2,65	48,29	83,00	9,3	11,2
44,0	45,0	2,65	52,13	25,35	9,7	11,4
44,0	47,0	2,65	51,49	74,04	9,1	11,4
58,0	59,0	2,65	67,97	23,16	9,7	11,9
58,0	61,0	2,65	67,24	68,43	9,1	11,9
70,0	71,0	2,65	94,58	22,78	9,8	12,6
70,0	73,0	2,65	94,58	68,21	9,1	12,6

За рівняннями (1)–(18) нами розраховані такі показники: коефіцієнт тепловіддачі від гарячого повітря (623 К) до крапель кислоти різних концентрацій; тривалість прогріву крапель від їх початкової (294 К) до температур мокрого термометра; тривалість упарення кислоти від початкової концентрації до кінцевої. Результати цих розрахунків наведені у таблиці.

**Експериментальна частина.** Дослідження здійснювали у порожнистій вертикальній колоні 4, схема якої зображена на рис.1, при безпосередньому контакті гарячого повітря (теплоносії) з краплею кислоти.

Колону виготовлено так, щоб унеможливити контакт краплі з її поверхнею та забезпечити можливість теплообміну між краплями кислоти та гарячим повітрям за умов її вільного падіння в об'ємі апарата. Робоча частина колоні складалася з 4-х кварцових труб, висота кожної 0,5 м, внутрішній діаметр 0,1 м. Це давало змогу регулювати висоту колоні від 0,5 до 2 м, а відтак – час легу краплі.

Постійну температуру газового середовища в колоні підтримували нагріванням повітря, яке

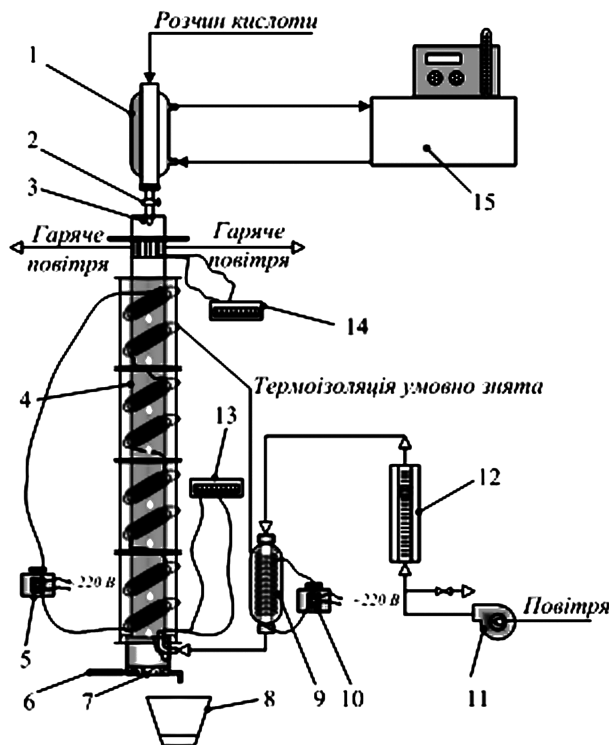


Рис.1. Схема лабораторної установки для вивчення процесу упарювання розчинів сульфатної кислоти: 1 – мірна ємність; 2 – кран; 3 – капіляр; 4 – випарна колона; 5, 10 – ЛАТР; 6 – термометр; 7 – пристрій для вловлення упареної кислоти; 8 – ємність; 9 – нагрівач повітря; 11 – компресор; 12 – ротаметр; 13, 14 – вторинний прилад термометра (мілівольтметр); 15 – термостат.

подавали у колону. Для цього використовували електронагрівач 9, у який за допомогою компресора 11 через ротаметр 12 подавали повітря. Для компенсації втрат теплоти на прогрів крапель, випаровування води та втрат теплоти у довкілля на зовнішні поверхні труб намотано ніхромові спіралі електронагрівачів. Потужність нагрівання регулювали за допомогою лабораторних автотрансформаторів (ЛАТР) 5 та 10. Поверх спіралі була встановлена скляна труба, обмотана азбестовою тканиною.

Розчини сульфатної кислоти подавали у випарну колону з мірної ємності 1 за допомогою крана 2 та капіляра 3, якими задавали частоту подачі крапель кислоти та їх розмір. Краплі поступали у колону з інтервалом 1,5–2 с, що забезпечувало їхню максимальну сфероподібність. Для підтримання необхідної температури кислоти на вході у колону ємність 1 була оснащена водяною сорочкою, температуру якої задавали термостатом 15.

Після контакту з газовою фазою краплі кислоти попадали у вловлюючий пристрій 7, в якому мінімізувався їх контакт з гарячими газами колоні та довкіллям. Упарену сульфатну кислоту збирали в ємності 8.

Концентрацію кислоти до та після упарювання визначали кислотно-основним титруванням. Масу випареної з краплі води розраховували, виходячи з концентрацій сульфатної кислоти до та після упарювання, об'єму кислоти та кількості крапель.

Час падіння крапель (час контактування крапель з газовою фазою) розраховували за такою формулою [5]:

$$L = (w^2/g) \cdot \ln \operatorname{ch} (g \tau / w), \quad (19)$$

де  $L$  – висота падіння краплі, м;  $g$  – прискорення вільного падіння ( $9,81 \text{ м/с}^2$ );  $\operatorname{ch}$  – гіперболічний косинус;  $\tau$  – час падіння краплі, с;  $w$  – усталена гранична швидкість краплі, яку визначали за рівнянням Ріттінгера-Фінкея, м/с;

$$w = 4,43 [(d (\rho_p - \rho_r) / \rho_r)]^{0,5}, \quad (20)$$

де  $d$  – діаметр краплі, м;  $\rho_p$ ,  $\rho_r$  – густина розчину та газу,  $\text{кг/м}^3$ ;

Вплив швидкості газу на час падіння краплі не враховували, оскільки швидкість газу у всіх дослідах була постійною та відносно малою.

Дослідження здійснювали при температурі газового середовища в колоні 623 К та лінійної швидкості газу в колоні 0,32 м/с.

Залежність коефіцієнта теплопровідності від концентрації кислоти (рис.2) свідчить, що із

збільшенням концентрації кислоти коефіцієнт тепловіддачі, як і очікувалося, зменшується. Так, у колоні висотою 2 м при радіусі крапель 0,002 м та часі контактування «крапля — газова фаза» 0,66 с коефіцієнт тепловіддачі для концентрації кислоти 26 % становить 964 Вт/(м<sup>2</sup>·К); для 34 % — 763 Вт/(м<sup>2</sup>·К); для 44 % — 566 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Особливо різке падіння спостерігається при концентраціях кислоти вище 45 %, тобто швидкість упарювання різко знижується під час упарювання розчинів сульфатної кислоти до високих концентрацій. Так, при концентрації 58 % коефіцієнт тепловіддачі зменшився приблизно у 3 рази порівняно із значенням його при концентрації 26 %. Це зумовлено тим, що з підвищенням концентрації кислоти зменшується теплопровідність та збільшується в'язкість розчину. Подібна картина спостерігається й для крапель інших розмірів.

Збільшення висоти колони привело до зростання коефіцієнта тепловіддачі. Так, для концентрації кислоти 26 %, радіуса краплі 0,002 м та часу контактування «крапля — гаряче повітря» 0,46 с коефіцієнт тепловіддачі становив 718 Вт/(м<sup>2</sup>·К), а за час контактування «крапля — газове середовище» 0,66 с коефіцієнт тепловіддачі зріс до 964 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Це, очевидно, можна пояснити наступним. Час прогріву крапель в обох випадках є однаковим, а час випаровування у вищій колоні більшим. Під час випаровування коефіцієнт тепловіддачі більший, ніж під час прогріву, як вже вказувалося, за рахунок інтенсивного виділення водяної пари з крапель та різкої турбулізації газового шару навколо краплі.

Порівняння одержаних значень коефіцієнта тепловіддачі з розрахунковими значеннями за

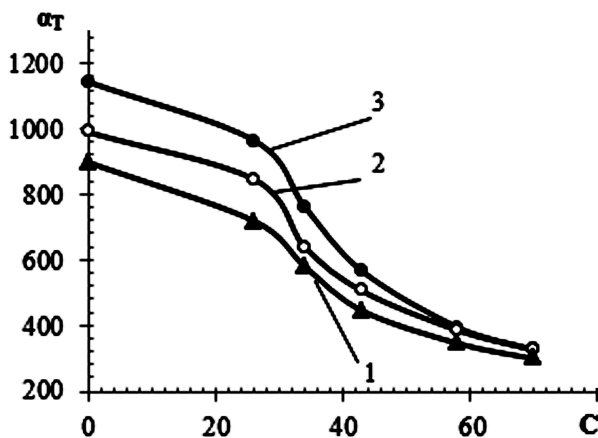


Рис.2. Залежність коефіцієнта тепловіддачі ( $\alpha_t$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К)) від концентрації сульфатної кислоти (С, % (мас.)). Час контактування, с: 1 — 0,46; 2 — 0,56; 3 — 0,66. Радіус крапель 0,002 м.

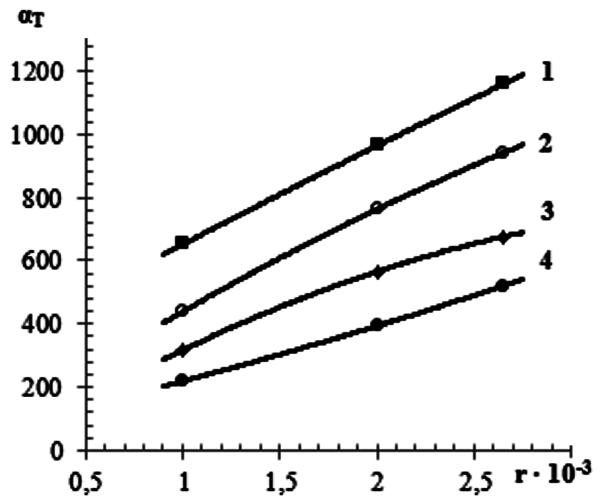


Рис.3. Залежність коефіцієнта тепловіддачі ( $\alpha_t$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К)) від радіуса крапель r, м. Концентрація кислоти, % (мас.): 1 — 26; 2 — 34; 3 — 44; 4 — 58,0. Час контактування 0,66 с.

формулами (1)–(18) та за математичною моделлю [3] (див. таблицю) показує, що вони відрізняються у 10–100 разів. Таку величезну різницю можна пояснити тим, що у математичних моделях [3, 4] розглядали ламінарний режим випаровування води з крапель. Насправді, за рахунок великих різниць температур між газовою фазою та краплею, а відтак інтенсивного випаровування, має місце різка турбулізація газової фази навколо краплі та потоншення нерухомої газової плівки навколо краплі. За рахунок останнього різко зростає коефіцієнт тепловіддачі.

Залежність коефіцієнта тепловіддачі від розміру крапель показано на рис.3.

Як видно з результатів досліджень, із збільшенням розмірів крапель коефіцієнт тепловіддачі зростає. Ця залежність суперечить усім відомим математичним моделям [3, 4]. Таку невідповідність можна пояснити тим, що із збільшенням розміру крапель зменшується їх сферичність; краплі набувають еліпсоподібної форми. Це значить, що поверхня краплі є більшою від прийнятої під час розрахунку коефіцієнта тепловіддачі. Цей факт підтверджений фотографуванням крапель цифровим фотоапаратом.

Крім того, особливістю краплинної структури рідинного потоку є так звані кінцеві ефекти: формування крапель, їх дроблення та коалесценція, а також внутрішньокрапельна циркуляція рідини [6]. Все це різко інтенсифікує масоперенос у нестационарних гідродинамічних режимах руху фаз, що зумовлене активним оновленням поверхні фазового контакту.

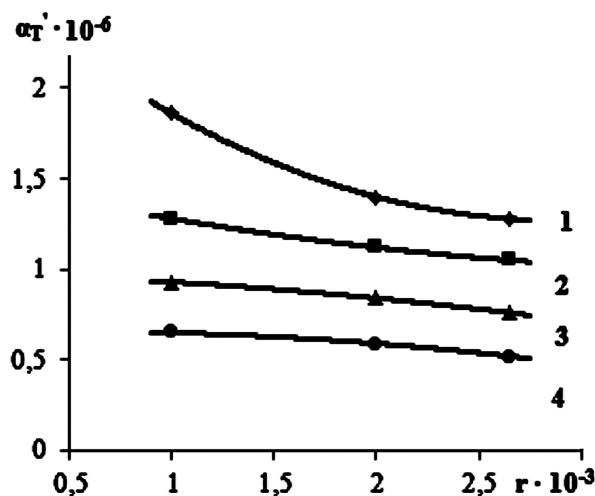


Рис.4. Залежність об'ємного коефіцієнта тепловіддачі ( $\alpha_T'$ , Вт/(м<sup>3</sup>·К)) від радіуса крапель ( $r$ , м). Концентрація кислоти, % (мас.): 1 – 26,2; 2 – 34,0; 3 – 43,0; 4 – 58,0. Час контактування 0,66 с.

Із збільшенням розміру краплі коефіцієнти масо- та теплопередачі в рідкій фазі зростають за рахунок зазначених кінцевих ефектів. Проте із зменшенням розміру краплі зростає питома поверхня. Тобто існує критичний розмір краплі  $d_{кр}$ , при якому масо- та тепловіддача у краплі будуть мінімальними. Цей критичний діаметр визначають за критеріальним рівнянням Плита [7].

Одержана залежність  $\alpha_T = f(r_K)$  може призвести до хибного уявлення про те, що швидкість упарювання є більшою, якщо краплі крупніші. Для дослідження цього нами був розрахований об'ємний коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_T'$ , який вказує на кількість теплоти, що передається теплоносієм 1 м<sup>3</sup> диспергованого розчину за час 1 с та рушійній силі 1 К. Ця залежність наведена на рис.4, з якої видно, що із зменшенням розмірів крапель для всіх концентрацій кислоти об'ємний коефіцієнт тепловіддачі збільшується, тобто швидкість випаровування зростає.

Проте при розмірі крапель менш 1 мм зростає ймовірність вносу крапель газовим потоком, тому рекомендований мінімальний діаметр – 1 мм [8].

### Висновки

Гарячі відхідні гази охолодження твердих речовин, наприклад, пігментного титану (IV) оксиду після печей прожарювання у металургійній та хімічній промисловості, виробництві будівельних матеріалів містять велику

кількість енергії, мають малий вологовміст та можуть бути використані для упарювання сульфатної кислоти.

2. Проведені лабораторні дослідження показали таке:

а) розрахунок коефіцієнта тепловіддачі від газової фази до краплі за відомими математичними моделями є дуже заниженим та не може бути використаний під час проектування упарювальної колони;

б) процес упарювання розчинів сульфатної кислоти у порожнистій вертикальній колоні відбувається з великою швидкістю;

в) швидкість упарювання різко знижується під час упарювання розчинів сульфатної кислоти до високих концентрацій;

г) диспергування розчинів сульфатної кислоти слід здійснювати до крапель діаметром 1–2 мм.

Отримані результати можуть бути використані для проектування заводських установок.

### Список літератури

1. Kalymon Ya.A., Helesh A.B., Yavorskyi O.Ye. Hydrolytic Sulphate Acid Evaporation by Waste Gases from Burning Furnaces of Meta-Titanic Acid Paste // Chemistry & Chemical Technology. – 2012. – № 6. – Р. 423–429.
2. Пат. 32571 Укр., МПК С 01 В 17/00 (2007). Спосіб концентрування відпрацьованих розчинів сульфатної кислоти / В.Т.Яворський, Я.А.Калимон, З.О.Знак, А.Б.Гелеш, О.О.Тригуба. – Опубл. 26.05.08, Бюл. № 10.
3. Емельянов А.Л., Платунов Е.С. Кинетика испарения капель в системах охлаждения теплонагруженных элементов приборов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54, № 1. – С. 84–88.
4. Селиванов С.Е., Кулик М.И. Кинетика испарения капель жидких топлив // Вестник Харьков. нац. автомобильно-дорож. ун-та. – 2011. – № 52. – С. 105–109.
5. Куротчин И.Н., Яворский В.Т., Калымон Я.А. К вопросу об определении параметров неустановившегося движения крупных капель // Вестник Львовского политехнического института. – 1985. – № 191. – С. 68–70.
6. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. – М.: Химия, 1984. – 256 с.
7. Плит И.Г. Химическая технология. – Харьков, 1967, Вып. 1. – С. 109–116.
8. Старк С.В. Газоочисные аппараты и установки в металлургическом производстве: Учеб. для вузов. – М.: Металлургия, 1990. – 400 с.

Надійшла до редакції 08.12.14

**Калымон Я.А.**, докт. техн. наук, проф., **Гелеш А.Б.**, канд. техн. наук,  
**Яворский О.Е.**, аспирант

*Национальный университет «Львовская политехника», Львов  
ул. С. Бандеры 12, 79013 Киев, Украина, e-mail: kalymon@polynet.lviv.ua*

## **Исследование процесса упаривания растворов серной кислоты в полой распылительной колонне**

Проанализирован процесс упаривания растворов серной кислоты в полой распылительной колонне. На основе материально-тепловых расчетов и литературных источников рассчитаны коэффициенты теплоотдачи от горячего воздуха к каплям кислоты различной концентрации, продолжительность прогрева и испарения капель. На основе экспериментальных данных, которые получены на укрупненной лабораторной установке, установлены зависимости коэффициента теплоотдачи от радиуса капли, концентрации кислоты и времени контакта «капля – газовая фаза». Экспериментально установлено, что значения коэффициента теплоотдачи в исследуемой системе в 10–100 раз больше по сравнению со значениями, которые рассчитаны по математическим моделям. Обосновано, что растворы серной кислоты целесообразно диспергировать до капель диаметром 1–2 мм. Полученные результаты предложено использовать для расчета испарительного аппарата и разработки технологии утилизации отходящих растворов серной кислоты. *Библ. 8, рис. 4, табл. 1.*

**Ключевые слова:** газовые выбросы, серная кислота, коэффициент теплоотдачи.

**Kalymon Ya.A.**, Doctor of Technical Science, Professor,  
**Helesh A.B.**, Candidate of Technical Science,  
**Yavorskyi O.Ye.**, PhD Student

*Lviv Polytechnic National University  
12, S. Bandera Str., 79013 Lviv, Ukraine, e-mail: kalymon@polynet.lviv.ua*

## **The Investigation of Boiled Process of Sulfuric Acid Solutions in the Hollow Spray Column**

The boiled process of sulfuric acid solutions in the hollow spray column is analysed. Based on the material and thermal calculations and literature sources -coefficients of heat transfer from the hot air to drops of different concentrations acid, duration of heating and drops boiling are calculated. Based on experimental data, obtained on enlarged laboratory setup, dependence of heat transfer coefficient on the drop radius is defined, acid concentration and contact time «drop – gas phase». It is defined experimentally that the heat transfer coefficient in the studied system is 10–100 times greater compared with the values calculated by mathematical models. It is proved that sulfuric acid solutions should be dispersed to droplets with a diameter of 1–2 mm. It is suggested to use the received results for the evaporator calculation and the development of utilization technology of sulfuric acid waste solutions. *Bibl. 8, Fig. 4, Tabl. 1.*

**Key words:** gas emissions, sulfuric acid, heat transfer coefficient.

## References

1. Kalymon Ya.A., Helesh A.B., Yavorskyi O.Ye. Hydrolytic Sulphate Acid Evaporation by Waste Gases from Burning Furnaces of Meta-Titanic Acid Paste. *Chemistry & Chemical Technology*, 2012, (6), pp. 423–429.
2. Pat. 32571 UA, МПК (2007) S 01 V 17/00. Concentration method of the sulfuric acid processed solutions / V.T.Yavorskyi, Ya.A.Kalymon, Z.O.Znak, A.B. Helesh, O.O.Tryhuba. Publ. 26.05.08, Bull. 10. (Ukr.)
3. Emelyanov A.L., Platunov E.S. Kinetika isparenija kapel' v sistemah ohlazhdenija teplonagruzhennykh jelementov priborov [The kinetics of drops evaporation in the cooling systems of heat loaded appliances elements]. *Izvestiya vuzov. Pryborostroenye*, 2011, 54 (1), pp. 84–88. (Rus.)
4. Selyvanov S.E., Kulyk M.Y. Kinetika isparenija kapel' zhidkikh topliv [The kinetics of drops evaporation of liquid fuels]. *Vestnyk Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universitetu*, 2011, (52), pp. 105–109. (Rus.)
5. Kurotchyn I.N., Yavorskyi V.T., Kalymon Ya.A. K voprosu ob opredelenii parametrov neustanovivshegosja dvizhenija krupnykh kapel' [Concerning the issue on the parameters definition of the large drops unspecified flow]. *Vestnyk Lvovskoho polytekhnicheskoho instytutu*, 1985, (191), pp. 68–70. (Rus.)
6. Pazhy D.H., Halustov V.S. Osnovy tehniky raspylivaniya gidkostej [Basic techniques of liquids atomization]. Moscow : Himija, 1984, 256 p. (Rus.)
7. Plyt I.H. Himicheskaja tehnologija [Chemical technology]. Kharkov: 1967, iss. 1, pp. 109–116. (Rus.)
8. Stark S.V. Gazochisnye apparaty i ustanovki v metalurgicheskom proizvodstve [Gas treatment equipment apparatus and systems in metallurgical production]. Moscow : Metallurgija, 1990, 400 p. (Rus.)

Received December 8, 2014

---

**Подписывайтесь на журнал  
«Энерготехнологии и ресурсосбережение» (индекс 74546)  
на 2015 г. по Сводному Каталогу агентства  
«УКРИНФОРМНАУКА»**

По вопросам организации подписки обращайтесь по адресам:

**в Украине**  
**Агентство «Укринформнаука»**  
ул. Владимирская, 54, комн. 144  
Киев-30, 01601  
тел. / факс +38 (044) 239-64-57  
моб. +38 (050) 154-77-83  
e-mail: innovation@nas.gov.ua

**в России**  
**Компания «Информнаука»**  
вед. специалист  
Перова Ольга Александровна  
тел.: 8(495) 787 38 73  
факс: 8(499) 152 54 81  
e-mail: perova@viniti.ru