UDK 66.074.3:504.3.054

CHIQINDI GAZLARNI XEMOSORBSIYA ASOSIDA TOZALASH TEXNOLOGIYALARINI TAKOMILLASHTIRISH

Tilavova Xurshida

Toshkent viloyat Qibray tuman 5-umumta`lim maktab o`qituvchisi

Annotatsiya. Maqolada sanoat chiqindi gazlarini xemosorbsiya usulida tozalashning fizik-kimyoviy asoslari va texnologik parametrlari tahlil qilingan. Oltingugurt dioksidini natriy gidroksid eritmasi bilan qarama-qarshi oqimli nasadkali kolonnada yutish jarayoni uchun lahzali kimyoviy reaksiya hisobga olingan ikki plyonkali massa almashinuvi modeli tuzildi. Tozalash samaradorligi absorbent konsentratsiyasi, suyuqlik sarfi, gaz tezligi va nasadka qatlami balandligiga bog‘liq holda hisoblandi. Absorbentning stexiometrik nisbati $\varphi < 1$ bo‘lganda samaradorlik reagent yetishmasligi bilan ($\eta \approx \varphi$), $\varphi \geq 1$ bo‘lganda esa gaz fazasidagi massa berish bilan cheklanishi ko‘rsatildi. Xemosorbsiya qurilmasini sensorlar, PI-rostlagich va SO_2 bo‘yicha oldindan kompensatsiya asosida raqamli boshqarish sxemasi taklif etildi.

Kalit so‘zlar: chiqindi gaz, xemosorbsiya, absorbent, massa almashinuvi, tezlanish koeffitsiyenti, SO_2, H_2S, CO_2, tozalash samaradorligi, avtomatik boshqarish.

Аннотация. В статье рассмотрены физико-химические основы и технологические параметры хемосорбционной очистки промышленных отходящих газов. Для абсорбции диоксида серы раствором гидроксида натрия в противоточной насадочной колонне построена двухплёночная модель массопередачи с учётом мгновенной химической реакции. Рассчитана степень очистки в зависимости от концентрации абсорбента, расхода жидкости, скорости газа и высоты слоя насадки. Показано, что при стехиометрическом отношении $\varphi < 1$ эффективность ограничивается недостатком реагента ($\eta \approx \varphi$), а при $\varphi \geq 1$ – массоотдачей в газовой фазе. Предложена схема цифрового управления хемосорбционной установкой на основе датчиков, ПИ-регулятора и упреждающей компенсации по SO_2.

Ключевые слова: отходящий газ, хемосорбция, абсорбент, массопередача, коэффициент ускорения, SO_2, H_2S, CO_2, степень очистки, автоматическое управление.

Abstract. The paper analyses the physicochemical principles and process parameters of chemisorption-based cleaning of industrial flue gases. A two-film mass-transfer model accounting for an instantaneous chemical reaction was developed for SO_2 absorption into sodium hydroxide solution in a countercurrent packed column. The removal efficiency was calculated as a function of absorbent concentration, liquid load, gas velocity and packing height. It is shown that at a

ISSN 3030-3907

stoichiometric ratio $\varphi < 1$ the efficiency is limited by reagent deficiency ($\eta \approx \varphi$), whereas at $\varphi \geq 1$ it is controlled by gas-side mass transfer. A digital control scheme of the chemisorption unit based on sensors, a PI controller and SO_2 feedforward compensation is proposed.

Keywords: flue gas, chemisorption, absorbent, mass transfer, enhancement factor, SO_2, H_2S, CO_2, removal efficiency, automatic control.

KIRISH.

Energetika, kimyo, neft-gaz, metallurgiya va sement ishlab chiqarish korxonalarining chiqindi gazlari tarkibida oltingugurt oksidlari (SO_2, SO_3), azot oksidlari (NO_x), vodorod sulfid (H_2S), ammiak (NH_3), uglerod dioksid (CO_2) va uchuvchan organik birikmalar mavjud. Jahon sog‘liqni saqlash tashkilotining 2021-yilgi tavsiyalarida SO_2 ning sutkalik o‘rtacha konsentratsiyasi uchun 40 mkg/m^3, NO_2 uchun 25 mkg/m^3 qiymatlar belgilangan [1], bu esa manbalarning o‘zida chiqindilarni chuqur tozalashni talab qiladi. O‘zbekiston Respublikasining «Atmosfera havosini muhofaza qilish to‘g‘risida»gi Qonuni ham korxonalardan ifloslantiruvchi moddalarning chiqarilishini me’yorlashni nazarda tutadi [2].

Chiqindi gazlarni tozalashda adsorbsiya, fizik absorbsiya, katalitik va termik oksidlash, membranali ajratish usullari qo‘llaniladi [3, 4]. Ular orasida xemosorbsiya – gaz komponentining suyuq yoki qattiq absorbent tarkibidagi faol modda bilan kimyoviy reaksiyaga kirishishi natijasida yutilishi – alohida o‘rin tutadi. Suyuq fazadagi reaksiya erigan komponentni bog‘lab, uning muvozanat bosimini amalda nolga tushiradi va massa almashinuvining harakatlantiruvchi kuchini oshiradi; natijada past konsentratsiyali gazlardan ham 95–99 % darajada tozalashga erishiladi [3, 5, 6].

Shu bilan birga, sanoat amaliyotida reagentning ortiqcha sarfi, ikkilamchi chiqindilar hosil bo‘lishi, apparatlar korroziyasi va jarayonning yuklama o‘zgarishiga sust moslashuvi kabi muammolar saqlanib qolmoqda. Ushbu muammolarni hal qilish jarayonning miqdoriy modeliga va uni raqamli boshqarishga asoslangan yondashuvni talab etadi.

TADQIQOTNING MAQSADI – sanoat chiqindi gazlarini xemosorbsiya asosida tozalash texnologiyasini massa almashinuvi modeli yordamida takomillashtirish va jarayonni avtomatik boshqarish tizimini asoslash. Maqsadga erishish uchun quyidagi vazifalar qo‘yildi: asosiy ifloslantiruvchi komponentlar va xemosorbentlarni tahlil qilish; kimyoviy reaksiya bilan kechadigan absorbsiya modelini tuzish; absorbent konsentratsiyasi, suyuqlik sarfi, gaz tezligi va qatlam balandligining tozalash samaradorligiga ta’sirini baholash; pH va reagent sarfini raqamli boshqarish sxemasini ishlab chiqish.

ISSN 3030-3907

ADABIYOTLAR TAHLILI.

Kimyoviy reaksiya bilan kechadigan gaz–suyuqlik massa almashinuvining nazariy asoslari P.V. Danckwerts monografiyasida [5] va klassik qo‘llanmalarda [4, 7, 8] batafsil yoritilgan. Unda jarayon tezligi Hatta soni Ha va tezlanish koeffitsiyenti E orqali tavsiflanadi; lahzali reaksiyalar uchun E ning yuqori chegarasi E_∞ reagent va gaz komponentining diffuziya oqimlari nisbati bilan aniqlanadi. A.L. Kohl va R.B. Nielsen [3] SO_2, H_2S va CO_2 ni tozalashning sanoat texnologiyalarini tizimlashtirgan. R.K. Srivastava va W. Jozewicz [6] ho‘l usuldagi desulfurlash tizimlari 90–98 % va undan yuqori samaradorlikka ega ekanini ko‘rsatgan. CO_2 ni aminli eritmalar bilan yutish kinetikasi H. Hikita va boshq. [9] tomonidan o‘rganilgan, aminli tozalashning zamonaviy holati G.T. Rochelle [10] ishida umumlashtirilgan. Nasadkali kolonnalarda massa berish koeffitsiyentlarini hisoblash uchun K. Onda va boshq. [11] korrelyatsiyalari keng qo‘llaniladi. Gazlarning suvdagi eruvchanligi (Genri konstantalari) R. Sander tomonidan tizimlashtirilgan [12]. Mahalliy adabiyotda absorbsiya jarayonlari va apparatlarini hisoblash usullari [13, 14] da keltirilgan. Biroq reagent sarfi, samaradorlik va boshqaruv algoritmini yagona model doirasida bog‘lovchi ishlar yetarli emas.

TADQIQOT METODOLOGIYASI.

Xemosorbsiya reaksiyalari. Kislotali gazlar ishqoriy va aminli absorbentlar bilan quyidagi reaksiyalar bo‘yicha bog‘lanadi [3, 5]:

$$SO_2 + 2NaOH \rightarrow Na_2SO_3 + H_2O, \quad (1)$$

$$H_2S + NaOH \rightarrow NaHS + H_2O, \quad (2)$$

$$CO_2 + 2RNH_2 \rightleftarrows RNHCOO^- + RNH_3^+. \quad (3)$$

(1) va (2) reaksiyalar proton almashinuvi bilan boradi va amalda lahzali hisoblanadi; (3) reaksiya ($R = HOCH_2CH_2–$ monoetanolamin uchun) chekli tezlikka ega va issiqlik ta’sirida qaytar, bu esa absorbentni regeneratsiya qilish imkonini beradi. Sanoatda qo‘llaniladigan asosiy xemosorbentlarning tavsifi 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

Kislotali gazlar uchun asosiy xemosorbentlar tavsifi [3, 6, 10]

Absorbent	Yutiladigan gaz	Asosiy mahsulot	Regeneratsiya	Xususiyati
NaOH (2–10 %)	SO_2, H_2S, HCl	Na_2SO_3, $NaHSO_3$, NaHS	yo‘q	yuqori tezlik, reagent qimmat
Na_2CO_3	SO_2	$Na_2SO_3 + CO_2$	qisman	CO_2 ajraladi
$Ca(OH)_2$, $CaCO_3$ suspenziyasi	SO_2	$CaSO_3 \cdot 0{,}5H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O$	yo‘q (gips)	arzon, cho‘kma hosil bo‘lishi

ISSN 3030-3907

Absorbent	Yutiladigan gaz	Asosiy mahsulot	Regeneratsiya	Xususiyati
NH_3 eritmasi	SO_2, CO_2	$(NH_4)_2SO_3$, $(NH_4)_2SO_4$	yo‘q (o‘g‘it)	ammiak yo‘qolishi
MEA (15–30 %)	CO_2, H_2S	$RNHCOO^-$	termik, 110–120 °C	$\Delta H \approx 85$ kJ/mol CO_2
MDEA (30–50 %)	H_2S (selektiv), CO_2	HCO_3^-, HS^-	termik	$\Delta H \approx 55$–60 kJ/mol CO_2

Tozalash samaradorligi quyidagicha aniqlanadi:

$$\eta = \frac{C_{\text{kir}} - C_{\text{chiq}}}{C_{\text{kir}}} \cdot 100\ \%, \quad (4)$$

bu yerda C_{kir}, C_{chiq} – ifloslantiruvchi moddaning apparatga kirishdagi va chiqishdagi konsentratsiyasi, mg/m^3.

Massa almashinuvi modeli. Ikki plyonkali nazariyaga ko‘ra A komponentning (SO_2) gaz fazasidan suyuqlikka o‘tish oqimi zichligi:

$$N_A = k_G(p_A - p_{Ai}) = k_L E C_{Ai}, \quad (5)$$

bu yerda k_G – gaz fazasidagi massa berish koeffitsiyenti, mol/(m^2·s·Pa); k_L – suyuq fazadagi massa berish koeffitsiyenti, m/s; p_A, p_{Ai} – komponentning gaz oqimidagi va fazalar chegarasidagi parsial bosimi, Pa; $C_{Ai} = p_{Ai}/H_A$ – chegaradagi konsentratsiya, mol/m^3; H_A – Genri konstantasi, Pa·m^3/mol; E – kimyoviy reaksiya hisobiga tezlanish koeffitsiyenti.

Lahzali reaksiyada tezlanish koeffitsiyenti o‘zining chegaraviy qiymatiga erishadi [5]:

$$E_\infty = 1 + \frac{D_B C_B}{\nu D_A C_{Ai}}, \quad (6)$$

bu yerda D_A, D_B – gaz komponenti va reagentning suyuqlikdagi diffuziya koeffitsiyentlari, m^2/s; C_B – reagent (OH^-) konsentratsiyasi, mol/m^3; ν – stexiometrik koeffitsiyent ((1) reaksiya uchun $\nu = 2$). (5) va (6) dan p_{Ai} ni chiqarib tashlab, oqim uchun yakuniy ifoda olinadi:

$$N_A = \frac{\frac{p_A}{H_A} + \frac{D_B}{\nu D_A} C_B}{\frac{1}{H_A k_G} + \frac{1}{k_L}}, \quad (7)$$

Bu ifoda reagent konsentratsiyasi kritik qiymatdan kichik bo‘lganda o‘rinli. Kritik konsentratsiyada reaksiya zonasi fazalar chegarasiga yetadi ($p_{Ai} = 0$) va jarayon to‘liq gaz fazasi bilan cheklanadi:

$$C_{B,\text{kr}} = \frac{\nu D_A k_G p_A}{D_B k_L}; \qquad N_A = k_G p_A \qquad (C_B \geq C_{B,\text{kr}}). \quad (8)$$

Qarama-qarshi oqimli kolonnaning dH elementi uchun gaz va suyuqlik bo‘yicha moddiy balans tenglamalari:

ISSN 3030-3907

$$G_M dy = -N_A a dH, \qquad L dC_B = \nu N_A a dH, \qquad (9)$$

bu yerda G_M – gazning molyar oqim zichligi, mol/(m²·s); $y = p_A/P$ – SO_2 ning mol ulushi; L – suyuqlikning hajmiy oqim zichligi, m³/(m²·s); a – fazalarning solishtirma kontakt yuzasi, m²/m³. (7)–(9) tizim chegaraviy shartlar $y(0) = y_{kir}$ (kolonna pastida) va $C_B(H) = C_{B,0}$ (kolonna tepasida) bilan otishma (shooting) usulida, ikkinchi tartibli Runge–Kutta sxemasi yordamida yechildi.

Gaz fazasi bilan cheklangan rejimda (8) dan tozalash samaradorligi uchun analitik ifoda kelib chiqadi:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{H}{H_{OG}}\right), \qquad H_{OG} = \frac{G_M}{k_G a P}, \quad (10)$$

bu yerda H_{OG} – gaz fazasi bo‘yicha massa ko‘chirish birligining balandligi, m. Reagent yetishmovchiligini baholash uchun stexiometrik nisbat kiritiladi:

$$\varphi = \frac{L C_{B,0}}{\nu G_M y_{kir}}, \qquad \eta \le \min\left(\varphi;\ \ 1 - \exp(-H/H_{OG})\right). \quad (11)$$

Hisoblash uchun qabul qilingan parametrlar 2-jadvalda keltirilgan. k_G va k_L qiymatlari 50 mm li Pall halqalari uchun Onda korrelyatsiyasi [11] bo‘yicha baholangan, gaz tezligiga bog‘liqligi $k_G a \sim w_g^{0,7}$ ko‘rinishida olingan; SO_2 ning Genri konstantasi [12] ma’lumotlari bo‘yicha 50 °C uchun qayta hisoblangan.

2-jadval

Modelning boshlang‘ich parametrlari

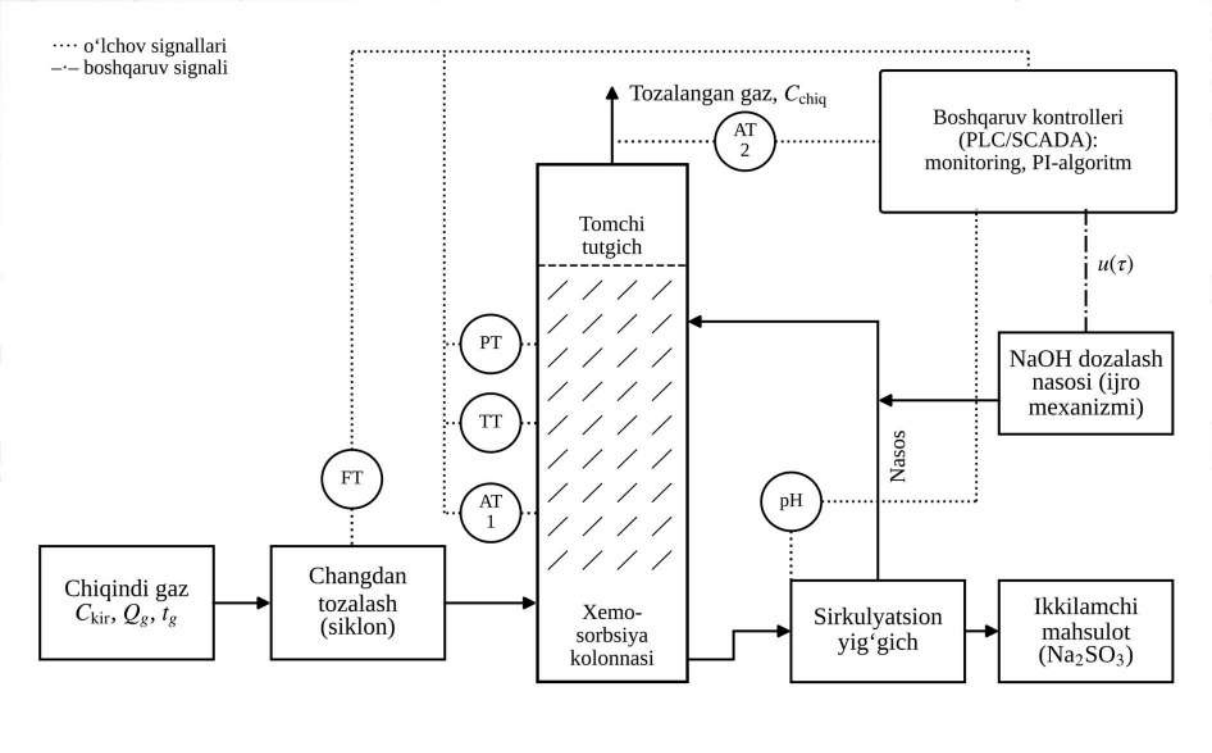
Parametr	Belgisi	Qiymati
Bosim / harorat	P / T	101,3 kPa / 323 K
SO_2 ning kirishdagi ulushi	y_{kir}	$2{,}0\cdot10^{-3}$ (≈ 5,7 g/m³)
Gazning fiktiv tezligi	w_g	1,0–2,0 m/s
Gazning molyar oqim zichligi (w_g = 1,5 m/s)	G_M	56,6 mol/(m²·s)
Solishtirma kontakt yuzasi	a	150 m²/m³
Gaz fazasida massa berish koeffitsiyenti	k_G	$7{,}4\cdot10^{-6}$ mol/(m²·s·Pa)
Suyuq fazada massa berish koeffitsiyenti	k_L	$1{,}0\cdot10^{-4}$ m/s
SO_2 ning Genri konstantasi (50 °C)	H_A	177 Pa·m³/mol
Diffuziya koeffitsiyentlari nisbati	D_B/D_A	2,0

NATIJALAR VA MUHOKAMA.

Raqamli monitoring va boshqaruv elementlari bilan jihozlangan xemosorbsiya qurilmasining taklif etilayotgan texnologik sxemasi 1-rasmda keltirilgan. Chiqindi gaz siklonda changdan tozalangach, nasadkali kolonnaning pastki qismiga beriladi va yuqoridan sug‘orilayotgan ishqoriy eritma bilan qarama-

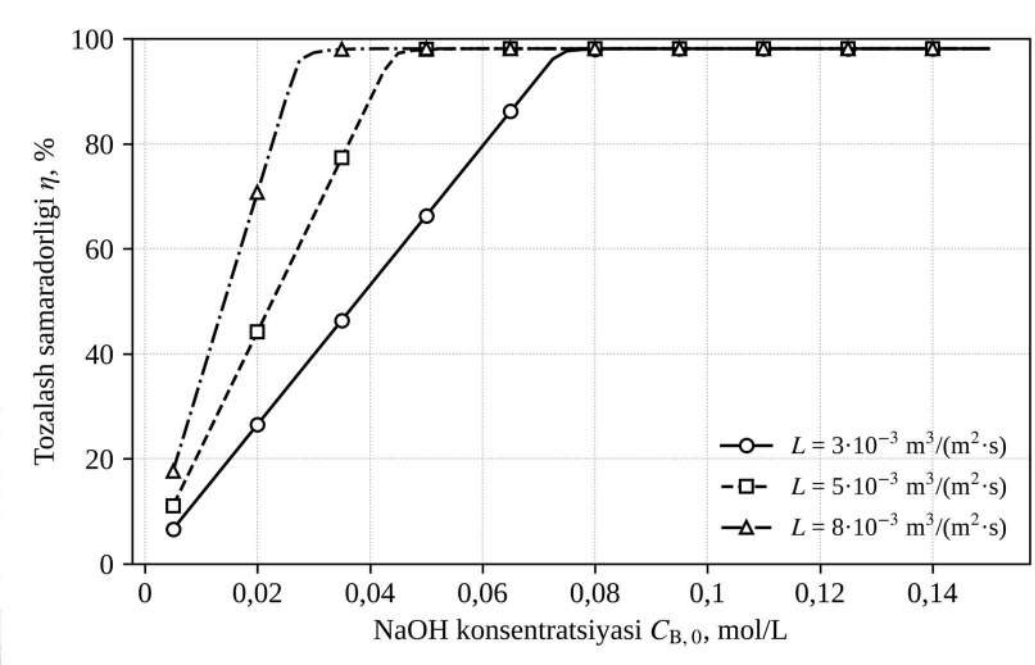
ISSN 3030-3907

qarshi oqimda kontaktga kirishadi. Kolonna yuqorisidagi tomchi tutgich aerozol tomchilarining olib ketilishini kamaytiradi.



1-rasm. Raqamli monitoringli xemosorbsiya qurilmasining texnologik sxemasi: FT – gaz sarfi, AT1/AT2 – kirish va chiqishdagi SO_2 analizatorlari, TT – harorat, PT – bosim datchiklari

(7)–(9) model bo‘yicha hisoblangan tozalash samaradorligining NaOH konsentratsiyasiga bog‘liqligi (H = 2,0 m, w_g = 1,5 m/s) 2-rasmda, tanlangan nuqtalar esa 3-jadvalda keltirilgan.



ISSN 3030-3907

2-rasm. SO_2 dan tozalash samaradorligining NaOH konsentratsiyasi va suyuqlik sarfiga bog‘liqligi (H = 2,0 m; w_g = 1,5 m/s; $y_{kir} = 2 \cdot 10^{-3}$)

3-jadval

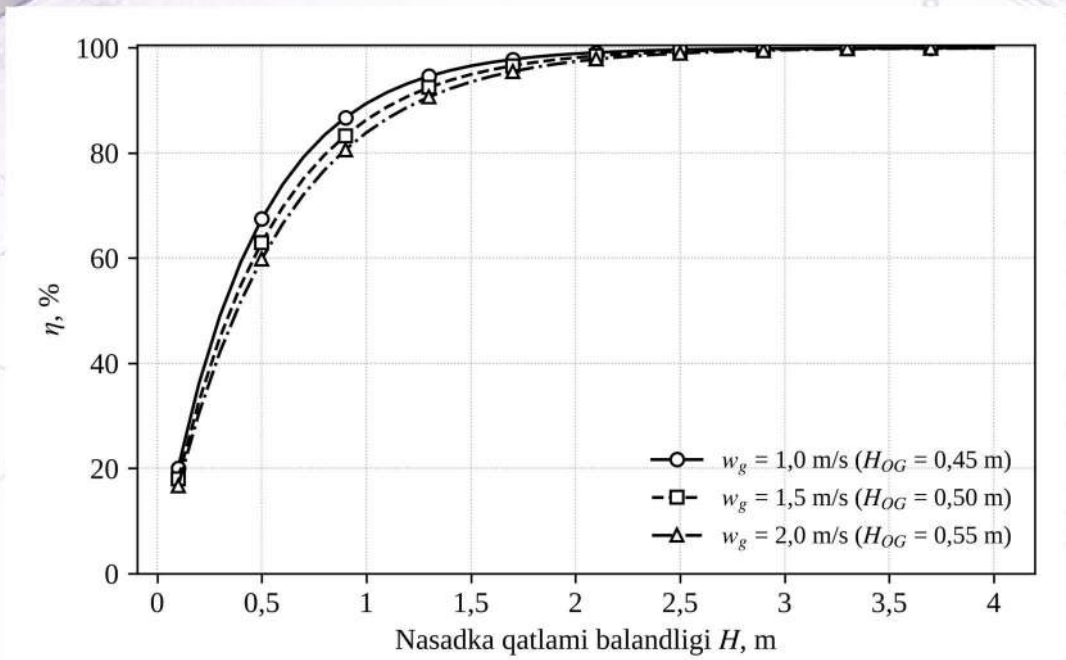
Stexiometrik nisbat va tozalash samaradorligi (hisob natijalari)

$L \cdot 10^3$, $m^3/(m^2 \cdot s)$	$C_{B,0}$, mol/L	φ	η, %	Cheklovchi omil
3,0	0,02	0,27	26,5	reagent
3,0	0,04	0,53	53,1	reagent
3,0	0,06	0,80	79,6	reagent
3,0	0,10	1,33	98,1	gaz fazasi
5,0	0,02	0,44	44,2	reagent
5,0	0,04	0,88	88,4	reagent
5,0	0,06	1,33	98,1	gaz fazasi
8,0	0,02	0,71	70,7	reagent
8,0	0,04	1,41	98,1	gaz fazasi

Natijalar jarayonning ikki xil rejimi mavjudligini ko‘rsatadi. $\varphi < 1$ bo‘lganda kolonnaning pastki qismida reagent to‘liq sarflanib, «charchagan» zona hosil bo‘ladi va samaradorlik amalda stexiometrik nisbatga teng bo‘ladi ($\eta \approx \varphi$). $\varphi \geq 1$ bo‘lganda esa reagent konsentratsiyasi butun balandlik bo‘yicha kritik qiymatdan (8) yuqori bo‘ladi: ko‘rib chiqilgan sharoitda $C_{B,kr} = \nu D_A k_G p_A / (D_B k_L) \approx 15$ mol/m^3 (0,015 mol/L), shuning uchun samaradorlik 98,1 % da to‘yinadi va NaOH konsentratsiyasini yanada oshirish uni ko‘tarmaydi, faqat reagentning ortiqcha sarfiga va korroziya xavfining ortishiga olib keladi. Demak, reagentni (11) ifoda bo‘yicha φ = 1,05–1,15 oralig‘ida dozalash optimal hisoblanadi.

Gaz fazasi bilan cheklangan rejimda samaradorlikni oshirishning yagona yo‘li – kontakt yuzasi yoki qatlam balandligini oshirish. (10) ifoda bo‘yicha hisoblangan bog‘liqliklar 3-rasmda va 4-jadvalda keltirilgan.

ISSN 3030-3907



3-rasm. Tozalash samaradorligining nasadka qatlami balandligi va gaz tezligiga bog‘liqligi (φ > 1)

4-jadval

Gaz tezligining massa ko‘chirish ko‘rsatkichlariga ta’siri

w_g, m/s	$k_G a \cdot 10^3$, mol/(m³·s·Pa)	H_{OG}, m	η (H = 1 m), %	η (H = 2 m), %	H (η = 99 %), m
1,0	0,84	0,45	89,4	98,9	2,05
1,5	1,11	0,50	86,3	98,1	2,32
2,0	1,36	0,55	83,9	97,4	2,53

Gaz tezligining 1,0 dan 2,0 m/s gacha oshishi H_{OG} ni 0,45 dan 0,55 m gacha kattalashtiradi, chunki G_M tezlikka chiziqli, $k_G a$ esa ~ $w_g^{0,7}$ bo‘yicha o‘sadi (H_{OG} ~ $w_g^{0,3}$). Shu sababli unumdorlikni ikki marta oshirish 99 % samaradorlikni saqlash uchun qatlam balandligini atigi ~23 % ga oshirishni talab qiladi. Bu xulosa mavjud kolonnalarni rekonstruksiya qilishda muhim ahamiyatga ega.

Raqamli boshqaruv. Yuklama (gaz sarfi va SO_2 konsentratsiyasi) o‘zgarganda reagentning doimiy dozalanishi sirkulyatsion eritma pH ining pasayishiga va φ < 1 rejimga o‘tishga olib keladi. Shu sababli 1-rasmdagi tizimda NaOH dozalash nasosi kontroller tomonidan quyidagi qonun bo‘yicha boshqariladi:

$$u(\tau) = K_c\left[e(\tau) + \frac{1}{T_i}\int_0^{\tau} e(\tau)d\tau\right] + u_{ff}(\tau), \qquad (12)$$

bu yerda $e(\tau) = pH_{ber} - pH(\tau)$ – rostlash xatoligi (pH_{ber} – berilgan qiymat); K_c, T_i – PI-rostlagichning kuchaytirish koeffitsiyenti va integrallash vaqti; u_{ff} – AT1 analizatori va FT sarf o‘lchagichi signallari asosida (11) ifoda bo‘yicha φ = const

ISSN 3030-3907

shartidan hisoblanadigan oldindan kompensatsiya tashkil etuvchisi. Teskari aloqa (pH) va oldindan kompensatsiyaning (SO_2 yuklamasi) birgalikda qo‘llanilishi reagent sarfini stexiometrik zaruratga yaqin ushlab turish va chiqishdagi konsentratsiyaning me’yordan oshishini oldini olish imkonini beradi.

Taklif etilayotgan yondashuvda tozalash samaradorligi, energiya sarfi, reagent sarfi va ikkilamchi chiqindi hajmi o‘rtasidagi muvozanat model asosida aniqlanadi: reagent $\varphi \approx 1{,}1$ da dozalanadi, talab qilingan η esa reagent ortiqchaligi hisobiga emas, balki (10) bo‘yicha tanlangan qatlam balandligi hisobiga ta’minlanadi.

XULOSA.

1. Kislotali gazlarni ishqoriy eritmalar bilan xemosorbsiyasi uchun lahzali reaksiyani hisobga oluvchi (5)–(11) model tuzildi; u tozalash samaradorligini absorbent konsentratsiyasi, suyuqlik sarfi, gaz tezligi va qatlam balandligi bilan bog‘laydi.

2. Jarayonning ikki rejimi aniqlandi: $\varphi < 1$ da samaradorlik reagent yetishmovchiligi bilan cheklanadi ($\eta \approx \varphi$), $\varphi \geq 1$ da – gaz fazasidagi massa berish bilan. Ko‘rib chiqilgan sharoitda ($H = 2$ m, $w_g = 1{,}5$ m/s) samaradorlik 98,1 % da to‘yinadi, NaOH ning kritik konsentratsiyasi ≈ 0,015 mol/L ni tashkil etadi.

3. Gaz tezligining 1,0 dan 2,0 m/s gacha ortishi H_{OG} ni 0,45 dan 0,55 m gacha oshiradi; 99 % samaradorlik uchun nasadka qatlami balandligi 2,05–2,53 m ni tashkil etadi.

4. pH bo‘yicha PI-rostlash va SO_2 yuklamasi bo‘yicha oldindan kompensatsiyani birlashtiruvchi raqamli boshqaruv sxemasi taklif etildi; u reagentni $\varphi \approx 1{,}1$ da dozalash va ikkilamchi chiqindilarni kamaytirish imkonini beradi.

Keyingi tadqiqotlarda model parametrlarini laboratoriya va pilot qurilmada olingan tajriba ma’lumotlari bilan tekshirish, turli absorbentlarni taqqoslash va regeneratsiya bosqichini optimallashtirish rejalashtirilgan.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. WHO global air quality guidelines: particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. – Geneva: World Health Organization, 2021. – 273 p.

2. O‘zbekiston Respublikasining «Atmosfera havosini muhofaza qilish to‘g‘risida»gi Qonuni, 1996-yil 27-dekabr, № 353-I.

3. Kohl A.L., Nielsen R.B. Gas Purification. – 5th ed. – Houston: Gulf Publishing Company, 1997. – 1395 p.

4. Treybal R.E. Mass-Transfer Operations. – 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 1980. – 784 p.

ISSN 3030-3907

5. Danckwerts P.V. Gas-Liquid Reactions. – New York: McGraw-Hill, 1970. – 276 p.
6. Srivastava R.K., Jozewicz W. Flue gas desulfurization: the state of the art // Journal of the Air & Waste Management Association. – 2001. – Vol. 51, № 12. – P. 1676–1688.
7. Green D.W., Southard M.Z. (eds.) Perry's Chemical Engineers' Handbook. – 9th ed. – New York: McGraw-Hill, 2019.
8. Seader J.D., Henley E.J., Roper D.K. Separation Process Principles. – 3rd ed. – Hoboken: Wiley, 2011.
9. Hikita H., Asai S., Ishikawa H., Honda M. The kinetics of reactions of carbon dioxide with monoethanolamine, diethanolamine and triethanolamine by a rapid mixing method // Chemical Engineering Journal. – 1977. – Vol. 13, № 1. – P. 7–12.
10. Rochelle G.T. Amine scrubbing for CO_2 capture // Science. – 2009. – Vol. 325, № 5948. – P. 1652–1654.
11. Onda K., Takeuchi H., Okumoto Y. Mass transfer coefficients between gas and liquid phases in packed columns // Journal of Chemical Engineering of Japan. – 1968. – Vol. 1, № 1. – P. 56–62.
12. Sander R. Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2015. – Vol. 15. – P. 4399–4981.
13. Рамм В.М. Абсорбция газов. – 2-е изд. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
14. Yusupbekov N.R., Nurmuhamedov H.S., Zokirov S.G. Kimyoviy texnologiya asosiy jarayon va qurilmalari. – Toshkent: Sharq, 2003.
15. Åström K.J., Hägglund T. Advanced PID Control. – Research Triangle Park: ISA, 2006.

ISSN 3030-3907