Vyjadrenie rovníc výšky vrstvy kontinuitne pracujúcich adsorpčných kolón (II)

Š. KACHAŇÁK, J. VALTÝNI

Katedra anorganickej technológie Slovenskej vysokej školy technickej, Bratislava

V predchádzajúcej práci [1] sa uviedol spôsob výpočtu vrstvy kontinuitných adsorpčných kolón pre prípad, keď pracovnú čiaru vyjadruje rovnica

$$q_x = q \cdot Q. \tag{1}$$

q_x vyjadruje stupeň nasýtenia adsorbenta vo výške L; q vyjadruje jeho stupeň nasýtenia pri odbere z kolóny; veličina Q je vyjadrená pomerom C/C_0, kde C je koncentrácia adsorbátu v nosnom plyne vo výške L a C_0 jeho koncentrácia v pôvodnej zmesi. Ak sa vyžaduje prakticky úplná regenerácia adsorbátu, čo je dôležité pri čistení priemyselných exhalátov, a ak do kolóny vstupuje čistý adsorbent, na výpočet sa použijú rovnice, ktoré sa už vyjadrili [1—4]. Ak podmienky systému sú iné, než predpokladá analýza uvedená v práci [1], je potrebné bilancovať proces podľa príslušných prevádzkových podmienok.

Nech pri vyčistení plynu z pôvodnej koncentrácie C_0 na hodnotu C_1 sa na dne adsorpčnej kolóny adsorbent, ktorý vstupuje do kolóny nasýtený na hodnotu x_1, nasýti na hodnotu x_0. Rovnica materiálovej bilancie procesu je:

$$V_1(x_0 - x_1) = V_2(C_0 - C_1), \tag{2}$$

kde V_1 = objemová rýchlosť odberu adsorbenta,
V_2 = objemový prietok nosného plynu.

V ľubovoľnej výške vrstvy platí:

$$V_1(x_0 - x) = V_2(C_0 - C), \tag{3}$$

pričom x a C sú nasýtenie adsorbenta a koncentrácia adsorbátu v danej výške vrstvy.

Rovnica (3) sa upraví na bezrozmerný tvar:

$$\frac{w \cdot C_0}{v \cdot a} \cdot \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) = \frac{x_0}{a} - \frac{x}{a}, \tag{4}$$

pričom v = lineárna rýchlosť postupu vrstvy cez kolónu,
a = rovnovážne nasýtenie adsorbenta pri koncentrácii C_0,
w = fiktívna lineárna rýchlosť nosného plynu v kolóne.

Rovnicu (4) možno po zavedení vzťahov:

$$\frac{w \quad C_0}{v \cdot a} = K_m; \quad \frac{x_0}{a} = q; \tag{5}$$

$$\frac{C}{C_0} = Q; \qquad \frac{x}{a} = q_x$$

upraviť na tvar

$$q_x = K_m \cdot Q + q - K_m. \tag{6}$$

Veličina K_m je smernicou pracovnej čiary a vyjadruje pomer medzi množstvom adsorbátu, ktoré do kolóny vstupuje, a maximálnym množstvom, ktoré je vrstva schopná adsorbovať.

Z materiálovej bilancie (*4*) s ohľadom na podmienky na hlave kolóny, kde $q_1 = x_1/a$, $Q_1 = C_1/C_0$, vyplýva:

$$K_m = \frac{q - q_1}{1 - Q_1}. \tag{7}$$

Rýchlostná rovnica za predpokladu, že β je parciálny koeficient prestupu látky v plynnej fáze, je vyjadrená výrazom [1]:

$$\frac{\beta}{w} \cdot L = \int_Q^1 \frac{\mathrm{d}Q}{Q - y/C_0}, \tag{8}$$

pričom y je rovnovážna koncentrácia adsorbátu, zodpovedajúca nasýteniu adsorbenta na hodnotu x vo výške L.

Rovnica (*8*) umožňuje vypočítať výšku vrstvy adsorbenta, potrebnú na dosiahnutie ľubovoľného stupňa vyčistenia plynu Q.

Pretože v súradnicovom systéme $q - Q$ je rovnovážna čiara vyjadrená rovnicou $y/C_0 = \mathrm{f}(q_x)$ a pracovná čiara rovnicou (*6*), možno veličinu y/C_0 vyjadriť ako funkciu premenných, určujúcich hodnotu veličiny q_x:

$$\frac{y}{C_0} = \mathrm{f}(K_m, q, Q). \tag{9}$$

Rovnica (*8*) sa upraví na tvar

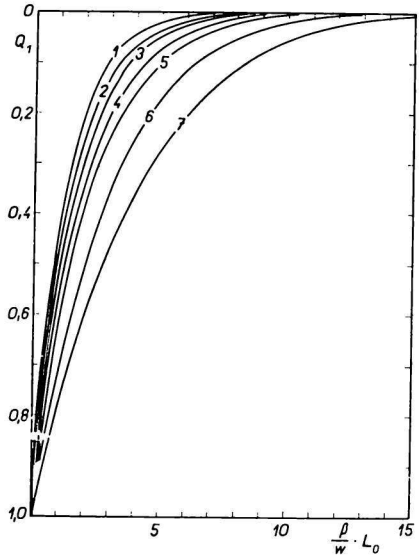
$$\frac{\beta}{w} \cdot L = \int_Q^1 \frac{\mathrm{d}Q}{Q - \mathrm{f}(K_m, q, Q)}. \tag{10}$$

So zreteľom na platnosť rovnice (*7*) sa môže vyjadriť aj v tvare

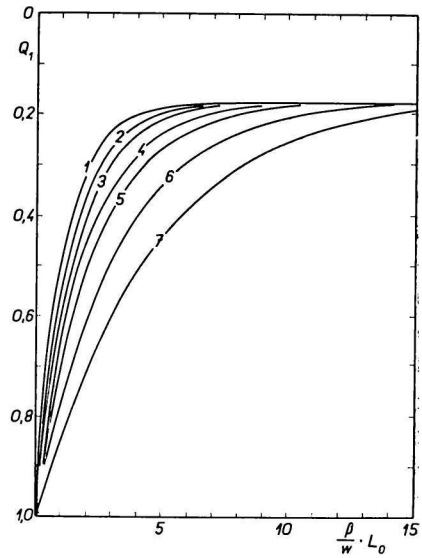
$$\frac{\beta}{w} \cdot L_0 = \int_{Q_1}^1 \frac{\mathrm{d}Q}{Q - \mathrm{f}(q_1, q, Q)}, \tag{11}$$

kde L_0 je výška vrstvy adsorbenta v kolóne, pretože Q_1 vyjadruje simplex koncentrácie adsorbátu pri výstupe z adsorbéra.

Na obr. 1 a 2 je táto závislosť znázornená pre oblasť platnosti Langmuirovej rovnice adsorpčnej izotermy pri $m = 0{,}5$ a hodnotách $q_1 = 0$, $q_1 = 0{,}3$ pre rôzne hodnoty stupňa nasýtenia na dne kolóny q.



Obr. 1. Závislosť Q_1 od $\beta \cdot w^{-1} \cdot L_0$ pre oblasť platnosti Langmuirovej adsorpčnej izotermy pre $m = 0{,}5$, $q_1 = 0$ a pre rôzne hodnoty q.
1. $q = 0{,}5$; *2.* $q = 0{,}7$; *3.* $q = 0{,}8$; *4.* $q = 0{,}9$; *5.* $q = 0{,}95$; *6.* $q = 0{,}99$; *7.* $q = 0{,}999$.



Obr. 2. Závislosť Q_1 od $\beta \cdot w^{-1} \cdot L_0$ pre oblasť platnosti Langmuirovej adsorpčnej izotermy pre $m = 0{,}5$, $q_1 = 0{,}3$ a pre rôzne hodnoty q.
1. $q = 0{,}5$; *2.* $q = 0{,}7$; *3.* $q = 0{,}8$; *4.* $q = 0{,}9$; *5.* $q = 0{,}95$; *6.* $q = 0{,}99$; *7.* $q = 0{,}999$.

Z uvedeného vyplýva, že prácu izotermickej protiprúdnej kontinuitnej kolóny v ustálenom stave opisuje týchto päť parametrov: q_1, q_x, Q, K_m, $\beta \cdot L \quad w^{-1}$. So zreteľom na špecifické okrajové podmienky sú to potom veličiny q_1, q, Q_1, K_m, $\beta \quad L_0 \quad w^{-1}$. Pre tieto veličiny s ohľadom na rovnice (*5*) a (*10*), resp. (*11*) platí:

$$\frac{\beta}{w} \cdot L_0 = f_1(q, K_m, Q_1) = f_2(q, q_1, Q_1), \tag{12}$$

$$q_1 = K_m \cdot Q_1 + q - K_m. \tag{13}$$

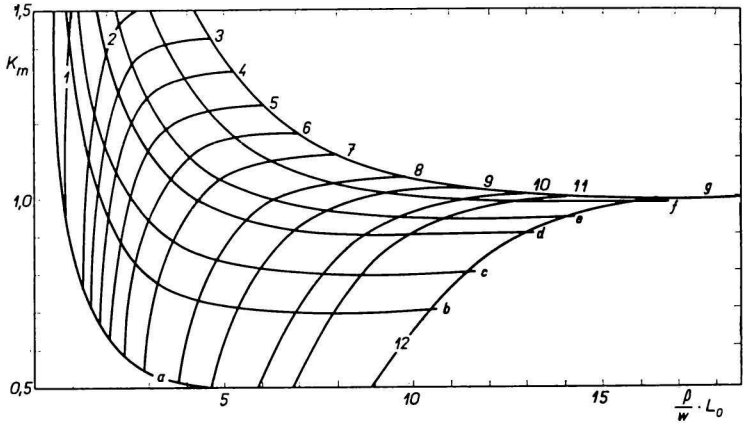
Sústava má teda tri stupne voľnosti. Pre jednoznačné zadanie úlohy a na jej úplný opis je potrebné udať okrem parametrov charakterizujúcich adsorpčné rovnováhy hodnoty niektorých troch premenných z uvedených piatich parametrov. Voľba nezávisle premenných je viac-menej ľubovoľná. Pretože kontinuitné adsorpčné zariadenia pracujú tak, že na adsorpciu bezprostredne nadväzuje desorpcia a obidve operácie sú zviazané cirkuláciou adsorbenta, hodnota q_1 závisí od podmienok desorpcie a nie je teda nezávisle premennou. To znamená, že zo štvorice premenných: q, Q_1, K_m, $\beta \cdot L_0 \cdot w^{-1}$ možno za nezávisle premenné prakticky pokladať iba dve. Z teoreticky možných kombinácií majú praktický význam tri:

a) Pri zadaných hodnotách q_1, q, Q_1 je potrebné vypočítať hodnoty K_m a $\beta w^{-1} . L_0$, teda z prevádzkového hľadiska rýchlosť odberu adsorbenta a výšku kolóny. Tento prípad je aktuálny pri výpočte kolóny, ktorá má dosiahnuť predpísané prevádzkové parametre. Hodnota K_m sa vypočíta z materiálovej bilancie (*7*) a rýchlosť odberu adsorbenta sa určí z rovnice (*5*). Hodnota $\beta w^{-1} . L_0$ sa vypočíta z rovnice (*11*). Na výpočet výšky kolóny je okrem toho potrebné poznať fiktívnu lineárnu rýchlosť plynu w, ktorá je daná pracovnými podmienkami, a hodnotu β, ktorú je potrebné určiť experimentálne buď priamo z kinetických meraní, alebo z dynamických meraní pomocou kritéria dynamiky adsorpcie [3].

b) Ak sa v priebehu procesu menia prevádzkové podmienky (C_0, w, x_1) a koncentrácia odchádzajúceho plynu nemá prekročiť stanovenú hranicu, treba zmeniť rýchlosť odberu adsorbenta, čím sa mení aj stupeň jeho nasýtenia na dne kolóny q. Za týchto podmienok je potrebné pri zadaných hodnotách q_1, Q_1, $\beta w^{-1} . L_0$ určiť hodnoty K_m, q. V tomto prípade sa sústava rovníc (*12*, *13*) rieši pre neznáme K_m a q. Zmenená rýchlosť odberu adsorbenta sa vypočíta z rovnice (*5*).

c) V treťom prakticky možnom prípade je potrebné pri zadaných hodnotách q_1, K_m, $\beta w^{-1} . L_0$ určiť hodnoty q, Q_1. Tento prípad má viac teoretický význam a vyjadruje zmenu hodnôt q, Q_1 pri zmene rýchlosti odberu adsorbenta alebo pri zmene lineárnej rýchlosti plynnej zmesi. Za uvedených podmienok sa sústava rovníc (*12*, *13*) rieši pre neznáme q, Q_1.

Napriek tomu, že pri podmienkach vyjadrených v bodoch *b*, *c* je L_0 = konšt, vo všeobecnosti $\beta w^{-1} . L_0 \neq$ konšt, pretože hodnota tohto kritéria závisí aj od

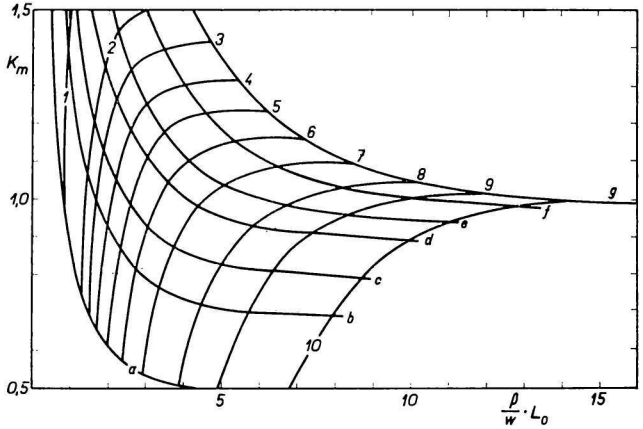


Obr. 3. Nomogram pre výpočet prevádzkových parametrov kontinuitnej adsorpčnej kolóny pre oblasť platnosti Langmuirovej adsorpčnej izotermy pre $m = 0{,}5$, $q_1 = 0$ a pre rôzne hodnoty q, Q_1.

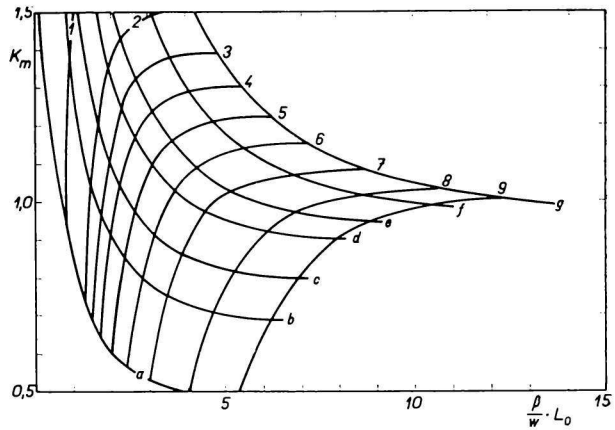
a) $q = 0{,}5$; *b*) $q = 0{,}7$; *c*) $q = 0{,}8$; *d*) $q = 0{,}9$; *e*) $q = 0{,}95$; *f*) $q = 0{,}99$; *g*) $q = 0{,}999$; *1.* $Q_1 = 0{,}5$; *2.* $Q_1 = 0{,}35$; *3.* $Q_1 = 0{,}30$; *4.* $Q_1 = 0{,}25$; *5.* $Q_1 = 0{,}2$; *6.* $Q_1 = 0{,}15$; *7.* $Q_1 = 0{,}1$; *8.* $Q_1 = 0{,}05$; *9.* $Q_1 = 0{,}025$; *10.* $Q_1 = 0{,}01$; *11.* $Q_1 = 0{,}005$; *12.* $Q_1 = 0{,}001$.

hodnôt w, β. Takisto sama hodnota rýchlostnej konštanty je funkciou w a C_0 [1]. Preto pri každej zmene prevádzkových parametrov treba osobitne určiť β a vypočítať hodnotu $\beta w^{-1} \cdot L_0$.

Pretože funkcia (*12*) je vo väčšine prípadov veľmi zložitá, nie je možné sústavu (*12*, *13*) explicitne analyticky riešiť a treba voliť numerické alebo grafické

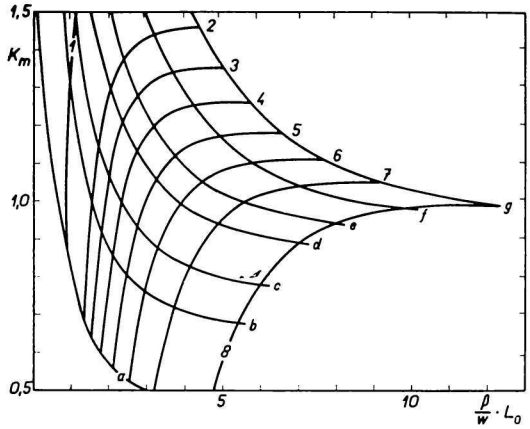


Obr. 4. Nomogram pre výpočet prevádzkových parametrov kontinuitnej adsorpčnej kolóny pre oblasť platnosti Langmuirovej adsorpčnej izotermy pre $m = 0{,}5$, $q_1 = 0{,}01$ a pre rôzne hodnoty q, Q_1.
a) $q = 0{,}5$; *b)* $q = 0{,}7$; *c)* $q = 0{,}8$; *d)* $q = 0{,}9$; *e)* $q = 0{,}95$; *f)* $q = 0{,}99$; *g)* $q = 0{,}999$; *1.* $Q_1 = 0{,}5$; *2.* $Q_1 = 0{,}35$; *3.* $Q_1 = 0{,}30$; *4.* $Q_1 = 0{,}25$; *5.* $Q_1 = 0{,}2$; *6.* $Q_1 = 0{,}15$; *7.* $Q_1 = 0{,}1$; *8.* $Q_1 = 0{,}05$; *9.* $Q_1 = 0{,}025$; *10.* $Q_1 = 0{,}01$.



Obr. 5. Nomogram pre výpočet prevádzkových parametrov kontinuitnej adsorpčnej kolóny pre oblasť platnosti Langmuirovej adsorpčnej izotermy pre $m = 0{,}5$, $q_1 = 0{,}02$ a pre rôzne hodnoty q, Q_1.
a) $q = 0{,}5$; *b)* $q = 0{,}7$; *c)* $q = 0{,}8$; *d)* $q = 0{,}9$; *e)* $q = 0{,}95$; *f)* $q = 0{,}99$; *g)* $q = 0{,}999$; *1.* $Q_1 = 0{,}5$; *2.* $Q_1 = 0{,}35$; *3.* $Q_1 = 0{,}30$; *4.* $Q_1 = 0{,}25$; *5.* $Q_1 = 0{,}2$; *6.* $Q_1 = 0{,}15$; *7.* $Q_1 = 0{,}1$; *8.* $Q_1 = 0{,}05$; *9.* $Q_1 = 0{,}025$.

metódy. Pre grafický výpočet parametrov kontinuitných adsorpčných kolón je výhodné vyjadriť vzťahy (*12*, *13*) pri konštantnom q_1 v súradniciach K_m, $\beta w^{-1} . L_0$. Na obr. 3 až 6 sú tieto závislosti znázornené v nomogramoch pre Langmuirov typ adsorpčnej izotermy a pre hodnotu $m = 0{,}5$. Rozsah premenných sa volil tak, aby umožnil vyjadriť celú prevádzkove dôležitú oblasť. Pomocou týchto nomogramov je možné pri danom q_1 určiť hodnoty ľubovoľných dvoch premenných, ak sú známe hodnoty ďalších dvoch premenných.



Obr. 6. Nomogram pre výpočet prevádzkových parametrov kontinuitnej adsorpčnej kolóny pre oblasť platnosti Langmuirovej adsorpčnej izotermy pre $m = 0{,}5$, $q_1 = 0{,}05$ a pre rôzne hodnoty q, Q_1.
a) $q = 0{,}5$; *b*) $q = 0{,}7$; *c*) $q = 0{,}8$; *d*) $q = 0{,}9$; *e*) $q = 0{,}95$; *f*) $q = 0{,}99$; *g*) $q = 0{,}999$; *1*. $Q_1 = 0{,}5$; *2*. $Q_1 = 0{,}35$; *3*. $Q_1 = 0{,}30$; *4*. $Q_1 = 0{,}25$; *5*. $Q_1 = 0{,}2$; *6*. $Q_1 = 0{,}15$; *7*. $Q_1 = 0{,}1$; *8*. $Q_1 = 0{,}05$.

Na nomogramoch sú dve sústavy kriviek. Krivky pre $q =$ konšt so zväčšovaním hodnôt $\beta w^{-1} . L_0$ klesajú a blížia sa k limite:

$$\lim K_m = \lim K_m = \frac{q - q_1}{1 - y_1/C_0}, \tag{14}$$

$$q = \text{konšt} \quad q = \text{konšt},$$

$$\frac{\beta}{w} . L_0 \to \infty \quad Q_1 \to y_1/C_0.$$

Krivky pre $Q_1 =$ konšt s rastúcou hodnotou $\beta w^{-1} . L_0$ stúpajú a blížia sa k limite:

$$\lim K_m = \lim K_m = \frac{1 - q_1}{1 - Q_1}, \tag{15}$$

$$Q_1 = \text{konšt} \quad Q_1 = \text{konšt},$$

$$\frac{\beta}{w} . L_0 \to \infty \quad q \to 1.$$

Krivky pre Q_1 = konšt a q = konšt sú ukončené v bodoch, kde už prakticky dosahujú vyššie uvedené limity. Ich ďalší priebeh je rovnobežný s osou $\beta w^{-1} . L_0$.

Ďakujeme pracovníkom Výpočtového strediska Ústavu strojov a automatizácie SAV, najmä inž. I. Planderovi, C. Sc., prom. mat. A. Fukaszovej a prom. mat. E. Kostolanskému za umožnenie všetkých potrebných výpočtov na samočinnom číslicovom počítači ZRA 1 a za poskytnutie pomoci pri zostavovaní a ladení programov.

Symboly

a	rovnovážne nasýtenie adsorbenta pri koncentrácii C_0	kg/m³
C	koncentrácia adsorbátu v plyne vo výške L	kg/m³
C_0	pôvodná koncentrácia adsorbátu v plyne	kg/m³
C_1	koncentrácia adsorbátu v plyne pri jeho odchode z kolóny	kg/m³
K_m	veličina, definovaná výrazom $\frac{w \; C_0}{v \, . \, a}$	bezrozmerné
L	premenná v rozsahu 0 — L_0	m
L_0	výška vrstvy	m
m	konštanta, charakterizujúca zakrivenie Langmuirovej adsorpčnej izotermy	bezrozmerné
q	stupeň nasýtenia adsorbenta pri jeho odbere z kolóny	bezrozmerné
q_1	stupeň nasýtenia adsorbenta vstupujúceho do kolóny	bezrozmerné
q_x	stupeň nasýtenia adsorbenta vo výške L	bezrozmerné
Q	simplex C/C_0	bezrozmerné
Q_1	simplex C_1/C_0	bezrozmerné
v	lineárna rýchlosť postupu vrstvy cez adsorbér	m/s
V_1	rýchlosť odberu adsorbenta	m³/s
V_2	objemový prietok nosného plynu	m³/s
w	fiktívna lineárna rýchlosť nosného plynu v kolóne	m/s
x	nasýtenie adsorbenta vo výške L	kg/m³
x_0	nasýtenie adsorbenta pri jeho odbere z kolóny	kg/m³
x_1	nasýtenie adsorbenta vstupujúceho do kolóny	kg/m³
y	rovnovážna koncentrácia adsorbátu v plyne, zodpovedajúca nasýteniu adsorbenta vo výške L	kg/m³
β	parciálny koeficient prestupu látky v plynnej fáze	s⁻¹

Súhrn

Vyjadrili sa rovnice pre výpočet rozloženia koncentrácie pozdĺž vrstvy kontinuitne pracujúcich izotermických adsorpčných kolón po dosiahnutí ustáleného stavu a pre výpočet výšky kontinuitných adsorpčných kolón pre ľubovoľné prevádzkové podmienky. Vykonala sa matematická analýza systému veličín, opisujúcich prácu kontinuitnej adsorpčnej kolóny v ustálenom stave, a vyjadrili sa prípady dôležité pre prax. Zostrojili sa nomogramy, ktoré umožňujú vyjadriť prevádzkove dôležité parametre pri rozličných pracovných podmienkach.

ВЫРАЖЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ВЫСОТЫ СЛОЯ НЕПРЕРЫВНО РАБОТАЮЩИХ КОЛОНН (II)

Ш. Каханьак, Я. Валтини

Кафедра неорганической технологии Словацкого политехнического института, Братислава

Вывелись уравнения для вычисления расположения концентрации вдоль слоя непрерывно работающих изотермических адсорбционных колонн после достижения стабилизированного состояния и для вычисления высоты непрерывных адсорбционных колонн для любых производственных условий. Был проведен математический анализ системы величин, описывающих работу непрерывной адсорбционной колонны в равновесном состоянии и выразились случаи, важные для практики. Сконструировались номограммы, позволяющие вычислить важные производственные параметры для различных рабочих условий.

DARSTELLUNG DER GLEICHUNGEN DER SCHICHTHÖHE VON KONTINUIERLICH ARBEITENDEN ADSORPTIONSKOLONNEN (II)

Š. Kachaňák, J. Valtýni

Lehrstuhl für anorganische Technologie an der Slowakischen Technischen Hochschule, Bratislava

Es werden die Gleichungen für die Ermittlung der Konzentrationsverteilung längs der Schicht von kontinuierlich arbeitenden isothermischen Adsorptionskolonnen nach Erreichung des Beharrungszustandes und für die Berechnung der Höhe der kontinuierlichen Adsorptionskolonnen für beliebige Betriebsbedingungen zur Darstellung gebracht. Ferner wurde eine mathematische Analyse des Systems jener Grössen durchgeführt, die die Arbeit der kontinuierlichen Adsorptionskolonnen im Beharrungszustand beschreiben, schliesslich wurden jene Fälle erläutert, die für die Praxis wichtig sind. Es wurden Nomogramme konstruiert, die es ermöglichen, betriebsmässige wichtige Parameter bei verschiedenen Arbeitsbedingungen zur Darstellung zu bringen.

LITERATÚRA

1. Kachaňák Š., *Chem. zvesti* ***15***, 575 (1961).
2. Kachaňák Š., Valtýni J., *Chem. zvesti* ***16***, 505 (1962).
3. Kachaňák Š., Valtýni J., Szauderová J., *Chem. zvesti* ***16***, 417 (1962).
4. Kachaňák Š., Valtýni J., Ewerlingová V., *Chem. zvesti* ***17***, 378 (1963).

Do redakcie došlo 14. 5. 1963

Adresa autorov:

Doc. inž. Štefan Kachaňák, C. Sc., inž. Ján Valtýni, Katedra anorganickej technológie SVŠT, Bratislava, Kollárovo nám. 2.