Archive of SID

تعیین ظرفیت حمل جامد و ثابت سنتیکی درجهٔ اول برای مولیبدنیت با استفاده از ستون فلوتاسیون پایلوت در کارخانهٔ آزمایشی تغلیظ مجتمع مس سر چشمه

سید مصطفی وزیری
دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشکده فنی- دانشگاه تهران
محمد کلاهدوزان
استادیار گروه مهندسی معدن- دانشکده فنی- دانشگاه تهران
محمد رضا یاراحمدی
کارشناس فرآوری- مجتمع مس سرچشمه
(تاریخ دریافت ۸۱/۹/۲۷ ، تاریخ تصویب ۸۲/۹/۸)

چکیده

برای تعیین نرخ حمل جامد و ثابت سنتیکی در ستونهای فلوتاسیون[۱] مدلهای مختلفی توسط محققین ارائه شده است. هر کدام از این مدلها تحت شرایط خاصی صحت پیدا می کند و نمی توان برای آنها عمومیت در نظر گرفت. این مسئله در مورد مدلهای تجربی اهمیت بیشتری دارد. معضل دیگری که در مورد مدلهای تجربی مطرح می باشد، تفاوت زیاد آنها با مقادیری است که از راه آزمایش حاصل می شود. بنابراین برای بزرگ مقیاس کردن [۲] ستونهای فلوتاسیون که ثابت سنتیکی و ظرفیت حمل پارامترهای اصلی هستند، برآورد این مقادیر از طریق آزمایش ضروری خواهد بود. در کارخانهٔ آزمایشی تغلیظ مس سرچشمه برای بزرگ مقیاس نمودن ستون فلوتاسیون نیمه صنعتی و طراحی ستون صنعتی برای مرحلهٔ شستشو درکارخانهٔ فرآوری مولیبدنیت، نرخ حمل و ثابت سنتیکی از طریق آزمایشهای خاصی اندازه گیری شده است. مقدار ظرفیت حمل حاصله از آزمایشها با مقادیر بدست آمده از مدلها، یکسان نیست و برای تفاوت دو مقدار، دلایلی ارائه گردیده است.

واژه های کلیدی : ستون فلوتاسیون، ثابت سنتیکی جمع آوری، ظرفیت حمل، بزرگ مقیاس نمایی

مقدمه

استفاده از ستونهای فلوتاسیون بدلیل دارا بودن خواص ویژه در پرعیار سازی کانیها در مرحله شستشو طی دو دهه اخیر بخصوص برای کانیهای مس و مولیبدن گسترش فراوانی یافته است. صرفه جویی در سطح زیر بنا، عدم نیاز به تجهیزات مکانیکی و امکان استفاده از آب شستشو جهت حذف ذرات ناخواسته وارد شده به کف از جمله مشخصات منحصر به فرد سلولهای ستونی است. علیرغم همه این مزایا نیاز به کنترل دقیق، تخصص پرسنل و بالاخص مشکلاتی که در تعمیم اطلاعات بدست آمده در مرحله آزمایشگاهی به مرحله طراحی صنعتی در این رابطه وجود دارد روند فراگیر شدن این روش را کند نموده است.

در این مقاله دو پارامتر ظرفیت حمل و ثابت سینتیکی که در روند طراحی سلولهای صنعتی مورد توجه قرار دارند بررسی می گردد.

برای بررسی نرخ فلوتاسیون [۳] از یک تابع سنتیکی درجه اول استفاده می شود. بین منظور اگر غلظت اولیه ذرات قابل فلوته شونده C_0 باشد، غلظت این ذرات در زمان t به صورت زیر خواهد بود[۵]:

$$C_t = C_0 . e^{-kt} \qquad (1)$$

k ثابت سنتیکی فرآیند فلوتاسیون است که از طریق آزمایشهای خاصی اندازه گیری می شود. با استفاده از

www.SID.ir

Archive of SID

رابطهٔ فوق، بازیابی عملیات فلوتاسیون به صورت زیر خواهد بود:

$$R = 1 - e^{-kt}$$

(۲)

در فلوتاسیون ستونی برای بازیابی آزمایشهای ناپیوسته [۴] از رابطهٔ زیر استفاده می شود:

$$R_{fc} = R_{\infty} \times \left(1 - \exp(-k_{fc} t)\right)$$

(۳)

که در آن R_{∞} حداکثر بازیابی است که در زمانهای طولانی بدست می آید. R_{fc} بازیابی کلی ستون است که در حقیقت برآیند بازیابی های دو زون کف (R_f) وجمع آوری (R_c) در ستون فلوتاسیون می باشد.

k_{fc} ثابت سنتیکی کلی ستون است. ثابت سنتیکی زون جمع آوری (k_c) بر اساس مدل زیر تخمین زده می شود:

$$k_{fc} = k_c \times R_f$$

(۴)

مدل تئوری ارائه شده برای ثابت سینتیکی جمع آوری در ستونهای فلوتاسیون به صورت زیر است:

$$k_c = \frac{1.5 J_g E_K}{d_b}$$

(۵)

که درآن E_K کارآیی جمع آوری می باشد. در عمل ثابت سینتیکی باید با روشهای آزمایشگاهی تخمین زده شود.

میزان نرخ حمل جامد توسط حبابها و انتقال آنها به بخش کنسانترهٔ ستونهای فلوتاسیون، غالباً تابع شرایط عملیاتی ستون است. این شرایط شامل نرخ گازدهی[۵]، قطر حبابها، اندازه و چگالی ذرات و غلظت مواد شیمیایی افزودنی می باشند. نرخ حمل جامد توسط مدلهای مختلفی بیان شده است. در همهٔ این مدلها نرخ حمل بر حسب $g/cm^2.\min$ بیان می گردد. حداکثر میزان نرخ حمل جامد در ستونها، ظرفیت حمل جامد [۶] نامیده می شود. ظرفیت حمل جامد را می توان با رابطه زیر نشان داد[۲]:

$$Ca = K_1 \frac{\pi d_p \rho_p j_g}{d_{bo}}$$

(۶)

که درآن j_g سرعت ظاهری گاز، d_{bo} قطر متوسط حبابها در بالاترین نقطهٔ ستون، d_p و ρ_p بترتیب قطر و چگالی ذرات و K_1 کسری از سطح حباب است که توسط ذرات جامد پوشیده شده است [۱].

رابطهٔ فوق بر اساس آنالیز ابعادی حاصل شده است[۲].

بررسی ها و آزمایشات مختلف برای تعیین ضریب ثابت K_1 نشان داده اند که حداکثر این مقدار حدود ۰/۵ است[۲]. مدل دیگری که برای تعیین ظرفیت حمل ارائه شده به صورت کاملاً تجربی، بر اساس داده های ستونهای فلوتاسیون در معادن مختلف، تعیین شده که به صورت زیر است[۳]:

$$Ca = 0.05 d_{80} \rho_p$$

(۷)

در اینجا d_{80} قطر دهانهٔ سرندی است که هشتاد درصد ذرات از آن می گذرند و بر حسب میکرون بیان می‌شود. چگالی ذرات نیز بر حسب g/cm^3 بیان می گردد.

از مقایسهٔ دو رابطه (۶) و(۷) می توان نتیجه گرفت که در رابطه (۷) ضریب عددی نمی تواند ثابت باشد، چون این ضریب در حقیقت تابعی از سرعت ظاهری گاز، قطر حباب و ضریب ثابت K_1 می باشد. این مدل منحصرا در محدودهٔ چگالی پالپ معادل $\rho_p \geq 4 gr/cm^3$ و سرعت ظاهری گاز معادل $j_g \geq 1.5 cm/s$ صحت دارد[۲]. با وجود مدلهای مختلفی که برای تعیین ظرفیت حمل جامد وجود دارد، برای طراحی و بزرگ مقیاس نمایی ستونهای فلوتاسیون مقدار ظرفیت حمل جامد را باید از طریق آزمایش بدست آورد. این مسئله به دلیل اهمیت این پارامتر در کارآیی ستونهای فلوتاسیون می باشد.

روش تحقیق و مواد

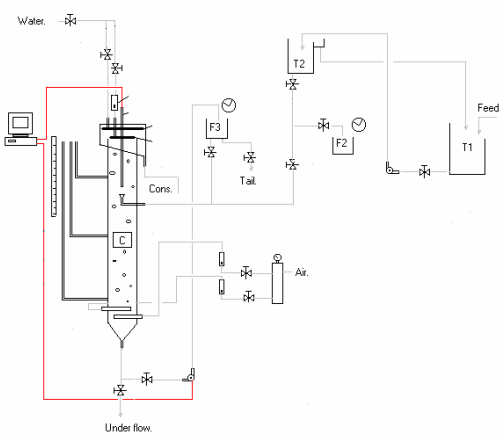
کلیهٔ آزمایشها در یک ستون فلوتاسیون نیمه صنعتی به قطر ۲۶ سانتیمتر و ارتفاع ۴/۸ متر انجام شده اند. اندازه گیری عمق کف در این ستون بر اساس تفاوت هدایت الکتریکی پالپ و کف، با استفاده از یک سیستم کنترلی

www.SID.ir

Archive of SID

اتوماتیک صورت می گیرد. برای اندازه گیری میزان دبی های پالپ و آب شستشو نیز از فلومترهای مربوطه استفاده می شود. شمای کلی این ستون در شکل (۱) نشان داده شده است. برای تعیین ظرفیت حمل و ثابت سنتیکی، نمونه هایی به صورت پالپ از محل ورودی کلینرهای پنجم، ششم و هفتم کارخانه فرآوری مولیبدنیت که برای ستون فلوتاسیون صنعتی در نظر گرفته شده، تهیه گردید. این نمونه ها پس از انتقال به کارخانهٔ پایلوت، در ستون فلوتاسیون نیمه صنعتی مورد آزمایش قرار گرفت.

برای تخمین ثابت سینتیکی با استفاده از آزمایشهای ناپیوسته میزان بازیابی کلی فلوتاسیون در زمان های مختلف تعیین می شود. برای

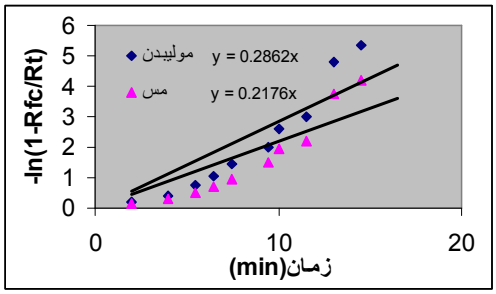


شکل ۱ : شمای کلی ستون فلوتاسیون مورد استفاده.

این منظور ابتدا ستون با پالپ مورد نظر پر می گردد و سپس ستون تحت هوادهی قرار می گیرد. به طور همزمان آب شستشو نیز وارد و کنسانترهٔ ستون در زمانهای معین به طور جداگانه جمع آوری می شود. پس از فیلتراسیون و خشک کردن کنسانتره های حاصله، عیار مولیبدن و مس در آنها با آنالیز شیمیایی تعیین می گردد، برای اینکه موازنهٔ جرم برقرار باشد، با استفاده از فرمول لاگرانژ تمامی عیارها تصحیح می شوند. بازیابی کلی فلوتاسیون با استفاده از رابطهٔ (۸) تعیین می گردد:

$$R_{fc} = \frac{C.c}{F.f} \qquad (۸)$$

c,C بترتیب وزن و عیار کنسانتره و f,F وزن و عیار خوراک هستند. بدین ترتیب با تجمعی کردن بازیابی های حاصله، میزان بازیابی حداکثر بدست می آید و با ترسیم نمودار $-\ln(1-\frac{R}{R_\infty})$ بر حسب زمان، شیب خط که همان ثابت سینتیکی است، محاسبه می گردد. در شکل(۲) این نمودار برای آزمایش S-12 نشان داده شده است. در این آزمایش بازیابی نهایی برای مولیبدن و مس به ترتیب ۹۶٪ و ۸٪ بوده است. در مجموع هفت آزمایش مختلف برای تعیین تأثیر پارمترهای مختلف بر روی ثابت سینتیکی انجام گرفته است. نتایج کلی این آزمایشها در جدول(۱) نشان داده شده است.



شکل ۲ : نمودار تعیین ثابت سینتیکی برای مس و مولیبدن در آزمایش S-12 .

همانطوریکه در جدول (۱) مشاهده می شود، با افزایش سرعت ظاهری گاز ثابت سینتیکی افزایش می یابد. با افزایش میزان سولفور سدیم به عنوان بازدارندهٔ مس، ثابت سینتیکی مس به طور قابل توجهی کاهش می یابد. نیزحذف زون کف باعث افزایش ثابت سینتیکی شده است. چون در این حالت بازیابی کلی افزایش یافته است. ثابت سینتیکی حاصله در این آزمایش مختص زون جمع آوری است و با توجه به رابطهٔ (۴)، میزان بازیابی زون کف ۶۸٪ بدست می آید. با افزایش سرعت ظاهری آب بایاس[۷] به دلیل افزایش میزان شستشوی کف و کاهش بازیابی کلی، ثابت سینتیکی کاهش پیدا کرده است. استفاده از حبابسازهای دو لایه نیز باعث کاهش ثابت سینتیکی شده است. شرایط استاندارد در آزمایشهای مشابه شرایط اعمال شده در آزمایش S-12 هستند و ثابت های سینتیکی

www.SID.ir

Archive of SID

حاصله برای مولیبدن و مس در این آزمایش می توانند برای بزرگ مقیاس نمایی ستون فلوتاسیون مورد استفاده قرار گیرند.

روش عملی تخمین ظرفیت حمل جامد در فلوتاسیون ستونی، تغییر نرخ جامد خوراک و تعیین نرخ حمل جامد

جدول۱ : شرایط عملیاتی اعمال شده در آزمایشهای سینتیکی و نتایج آنها.

نام تست	J_g (cm/s)	ε_g (٪)	J_B (cm/s)	عمق کف (cm)	غلظت سولفور(٪)	k_{fc} مس	k_{fc} مولیبدن
S-11	۰/۶۳	۲/۸	۰/۱	۱۰۰	۰/۲۵	۰/۱۸۱	۰/۲۴۷
S-12	۱/۲۶	۵/۵	۰/۱	۱۰۰	۰/۲۵	۰/۲۱۸	۰/۲۸۶
S-13	۱/۸۸	۷/۸	۰/۱	۱۰۰	۰/۲۵	۰/۲۴۹	۰/۳۱۵
S-14	۱/۲۶	۵/۵	۰/۱	۱۰۰	۰/۵	۰/۱۵۷	۰/۲۵۸
S-15	۱/۲۶	۴/۶	۰/۱	۰	۰/۲۵	۰/۲۲۲	۰/۴۲۱
S-16	۱/۲۶	۷/۳	۰/۱	۱۰۰	۰/۲۵	۰/۱۶۶	۰/۲۳۴
S-1	۱/۲۶	۵/۵	۰/۲۲	۱۰۰	۰/۲۵	۰/۱۰۷	۰/۲۷۱

جدول ۲ : میزان نرخ حمل جامد در مقابل نرخ جامد خوراک در عمق کف ۱۰۰ سانتیمتر.

میانگین نرخ حمل جامد (gr/min)	نمونهٔ سوم (gr/min)	نمونهٔ دوم (gr/min)	نمونهٔ اول (gr/min)	نرخ جامد خوراک (gr/min)
۱۰۱۶	۹۰۳	۱۱۳۱	۱۰۱۴	۲۹۸۴
۱۰۵۰	۷۹۲	۹۶۰	۱۳۹۸	۲۶۱۹
۱۱۰۴	۸۴۶	۱۲۹۰	۱۱۷۶	۲۱۱۱
۱۰۰۰	۱۰۳۴	۱۱۳۲	۸۳۴	۱۹۲۲
۶۶۷	۵۹۲	۷۶۴	۶۴۴	۱۷۶۶

به ازای آن می باشد.

تغییر نرخ جامد خوراک در یک دبی حجمی ثابت، با تغییر درصد جامد آن صورت می گیرد.

همانطورکه قبلاً اشاره شد، ظرفیت حمل جامد در حقیقت حداکثر نرخ حمل آن است. بنابراین با تعیین نرخ حمل جامد برای نرخهای جامد خوراک مختلف، می توان به حداکثر نرخ حمل جامد در ستون دست یافت.

با افزایش نرخ جامد خوراک، نرخ حمل جامد رو به افزایش گذاشته، تا حداکثر مقدار خود پیش می رود ولی پس از آن سیر نزولی پیدا می کند. در حقیقت نمودار نرخ حمل جامد بر حسب نرخ جامد خوراک دارای یک نقطهٔ ماکزیمم است که این نقطه مقدار ظرفیت حمل را دیکته می کند.

روش انجام آزمایشها به این صورت است که ابتدا ستون با پالپ پر می شود و سپس هوادهی صورت می گیرد. شرایط عملیاتی به صورت زیر تنظیم شده است:

دبی حجمی خوراک	1(lit/s)
دبی حجمی	0.85(lit/s)
دبی حجمی	0.3(lit/s)
دبی حجمی	0.1(lit/s)
سرعت ظاهری آب باياس	0.1(cm/s)
سرعت ظاهری گاز	1.59(cm/s)

آزمایشها در دو عمق کف ۱۰۰ و ۴۰ سانتیمتری انجام شده اند. کاهش درصد جامد خوراک با افزودن آب به آن و افزایش درصد جامد با ته نشین کردن ذرات جامد و برداشتن آب از روی پالپ صورت گرفته است.

بدلیل کم بودن مقدار نمونه، برای پایدار کردن عملکرد ستون با جمع کردن باطله و کنسانتره در داخل مخزن خوراک دهی و وارد کردن مجدد آنها به ستون، زمان لازم برای رسیدن بحالت پایدار[8] به ستون داده شده است. این کار قبل از باز کردن آب باياس و آب لاوکی صورت می گیرد.

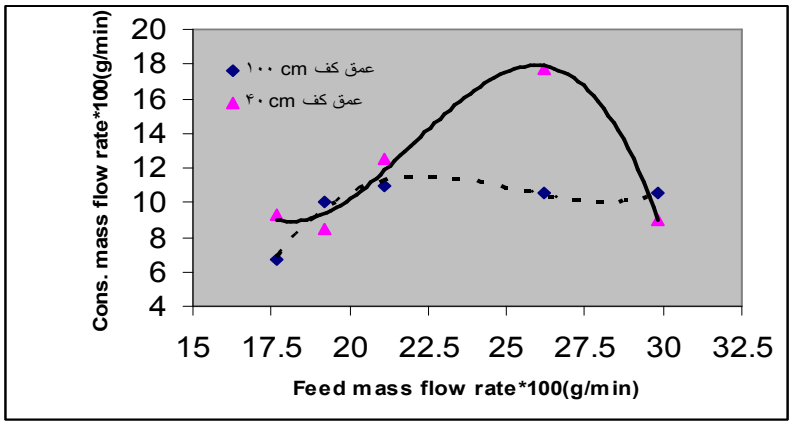
برای افزایش دقت کار، در هر آزمایش سه نمونه از کنسانتره در زمانهای مشخص گرفته شده است تا میانگین

www.SID.ir

Archive of SID

آنها به عنوان نرخ حمل منظور گردد. بعد از اتمام تستها نمونه های گرفته شده فیلتر و خشک شده اند تا جامد بدون رطوبت حاصل گردد. سپس نمونه ها توزین شده و با در نظرگرفتن زمان گرفته شدن نمونه ها، نرخ حمل جامد محاسبه گشته است. نتایج حاصل از آزمایشها برای عمق کف معادل ۱۰۰سانتیمتر به صورت جدول(۲) می باشد.

برای تعیین ظرفیت حمل جامد، نمودار نرخ حمل جامد بر حسب نرخ جامد خوراک برای دو عمق کف مذکور، به



شکل۳ : میزان نرخ حمل جامد در مقابل نرخ جامد خوراک.

صورت شکل (۳) ترسیم گردیده است.

برازش منحنی درجهٔ سوم برای داده ها، منجر به تعیین حداکثر نرخ حمل جامد برای دو عمق کف می شود و با تقسیم این مقادیر بر سطح مقطع ستون، مقدار ظرفیت حمل جامد حاصل می گردد. برای عمق کف ۱۰۰ و۴۰ سانتیمتر، مقدار ظرفیت حمل به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$Ca_{100} = 2.186\ gr/cm^2.\min$$

$$Ca_{40} = 3.335\ gr/cm^2.\min$$

در انجام آزمایشها فرض بر این بوده است که با تنظیم سرعت ظاهری گاز در حد ۱/۵۹سانتیمتر بر ثانیه، می توان نرخ حمل را از سرعت ظاهری گاز مستقل کرد. از طرف دیگر آزمایشهای مختلف نشان داده اند که میزان نرخ حمل جامد با کاهش عمق کف افزایش می یابد و این به دلیل کاهش اثر آب شستشو بر روی حبابهای باردار می باشد. این مسئله در اینجا نیز مشاهده می شود و با کاهش عمق کف از ۱۰۰ سانتیمتر به ۴۰ سانتیمتر، میزان ظرفیت حمل از مقدار ۲/۱۸۶ به ۳/۳۳۵ افزایش پیدا می کند. با توجه به رابطه (۷) و با در نظر گرفتن چگالی ۴/۳۵گرم بر سانتیمتر مکعب و اندازهٔ ذرات ۲۶ میکرون[4]، ظرفیت حمل به صورت زیر محاسبه می شود:

$$Ca = 5.655\ gr/cm^2.\min$$

همانطوریکه مشاهده می شود مقادیر با هم تفاوت زیادی دارند. در عمق کف ۱۰۰ سانتیمتری تفاوت بیشتر می شود و این ممکن است به دلیل پس زدگی زیاد ذرات روی حبابها [۹] و یا بدلیل اثر کلیدی تغییرات هیدرودینامیکی باشد. در هر حال برای عملیات بزرگ مقیاس نمایی ستون نیمه صنعتی و طراحی ستون صنعتی فلوتاسیون در کارخانهٔ فرآوری مولیبدنیت، بهتر است که مقادیر حاصل از آزمایش و مقادیرحاصل از مدل، تواماً در نظر گرفته شوند.

نتیجه گیری

۱- با افزایش سرعت ظاهری گاز همانطور که مدل پیش بینی می کند، ثابت سینتیکی افزایش می یابد. اما مطالعات مختلف نشان داده است که این روند افزایشی بعد از مدتی رو به کاهش خواهد گذاشت.

۲- ثابت سینتیکی به شدت وابسته به عمق کف است و با کاهش عمق کف افزایش پیدا می کند.

www.SID.ir

Archive of SID

۳- همانطورکه غلظت سولفور سدیم به عنوان بازدارندهٔ مس روی ثابت سرعت این جزء تأثیر زیادی دارد سایر مواد افزودنی هم باید روی ثابت سرعت تأثیر گذار باشند.

۴- با افزایش عمق کف میزان نرخ حمل جامد کاهش می یابد. کاهش میزان نرخ حمل جامد با افزایش عمق کف احتمالاً بدلیل افزایش اثر آب شستشو بر روی حبابها و پس زدن ذرات از روی حبابها است.

۵- نتایج حاصل از آزمایشات با نتایج مدل تفاوت فاحشی دارند و به همین دلیل برای طراحی ستون فلوتاسیون صنعتی و بزرگ مقیاس کردن ستون نیمه صنعتی، بایستی هر دو مقدار را در نظر گرفت تا بتوان ضریب اطمینان طراحی را بالا برد. ضرایب بکار برده شده در بزرگ مقیاس نمایی بر اساس یک دورنمای کلی از نتایج آزمایشگاهی، تجربیات گذشته و سعی و خطا خواهد بود.

تشکر و قدردانی

لازم است از زحمات بی دریغ جناب آقای مهندس رضایان ریاست محترم تحقیقات معدنی و فرآوری مواد، سرکار خانم مهندس زیدآبادی سرپرست محترم کارخانهٔ پایلوت تغلیظ، آقایان مهندس خیامی و شاه رحمانی کارشناسان فنی کارخانهٔ پایلوت تغلیظ مجتمع مس سرچشمه کرمان کمال تشکر بعمل آید.

همچنین از زحمات جناب آقای مهندس مؤمن آبادی سرپرست محترم کارخانهٔ فرآوری مولیبدنیت و سایر پرسنل آن واحد و تمامی عزیزانی که شرایط را برای انجام هر چه بهتر آزمایشات برای مؤلفین فراهم کردند کمال تشکر وقدردانی را داریم.

فهرست علائم اختصاری

C	وزن کنسانتره(g)
J_g	سرعت ظاهری گاز(cm/s)
c	عیار کنسانتره(٪)
k	ثابت سینتیکی (1/min)
Ca	ظرفیت حمل $g/\min/cm^2$
K_1	ضریب ثابت
C_t	غلظت مواد فلوته شونده در زمان t
k_c	ثابت سینتیکی زون جمع آوری
C_0	غلظت مواد فلوته شونده در t=0
k_{fc}	ثابت سینتیکی کلی
d_b	قطر حباب (mm)
R	بازیابی
d_{bo}	قطر حباب در بالای ستون(mm)
R_c	بازیابی زون جمع آوری
d_P	قطر ذره (mm)
R_f	بازیابی زون کف
d_{80}	قطر بر حسب ۸۰٪ عبوری (mm)
R_{fc}	بازیابی کلی
E_K	کارآیی جمع آوری
R_∞	بازیابی نهایی
F	وزن خوراک(g)
t	زمان(min)
f	عیار خوراک(٪)
ρ_P	چگالی ذره g/cm^3
J_B	سرعت ظاهری آب بایاس (cm/s)
ε_g	ماندگی گاز(٪)

مراجع

1- Finch, J. A. and Dobby, G. S. (1990). *Column flotation*, Pergamon Press, U.K., PP. 180.

2 - Ityokumbul, M. T. and Trubelja, M. P. (1998). "Carrying capacity in a pilot flotation column." *Mineral & Metallurgical Processing*, Vol. 15, No. 2, PP. 41-46.

3- Li, H., del Villar, R. and Gomez, C. O. (2001). "Carrying capacity determination and effect on concentration particle size." *Interactions in mineral processing,* PP. 33-45.

۴- مهدیزاده. س. م. "بهینه سازی بازداشت کانیهای سولفوری مس در کارخانهٔ فرآوری مولیبدن مجتمع مس سرچشمه." پایان نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ فنی دانشگاه تهران، (۱۳۷۹) .

www.SID.ir

Archive of SID

۵ - رضایی. ب. "فلوتاسیون." انتشارات دانشگاه هرمزگان، (۱۳۷۵).

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1- Flotation Columns
2 - Scale Up
3 - Flotation Rate
4 - Batch
5 - Gas Flow Rate
6 - Carrying Capacity
7 - Bias Water
8 - Steady State
9 - Froth Dropback

www.SID.ir