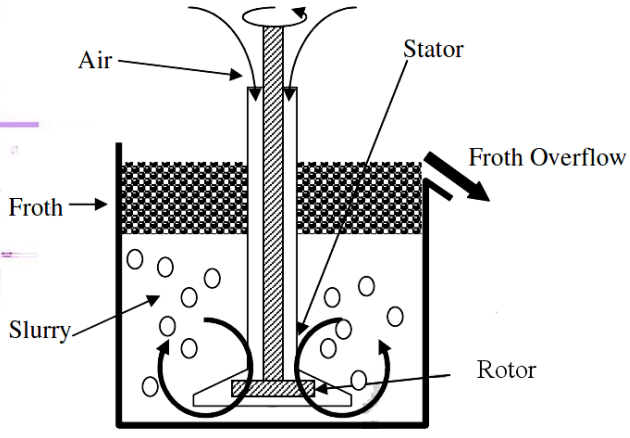
اصول طراحی کارخانه های کانه آرایی

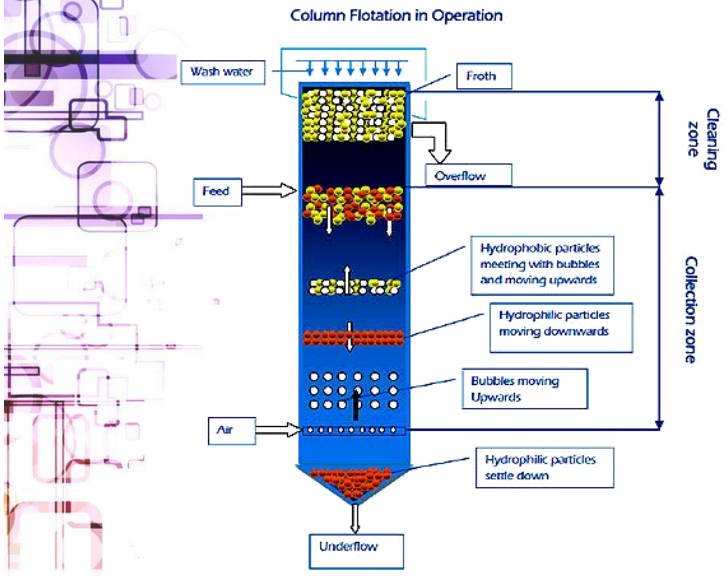
جلسه پانزدهم

مهدی نصیری سروی
دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان
۱۳۹۵

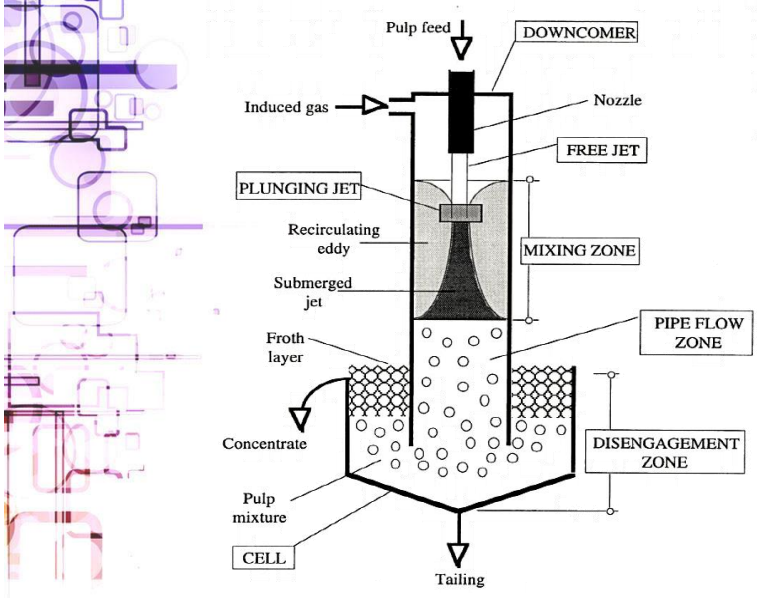
فلوتاسیون



فلوتاسیون



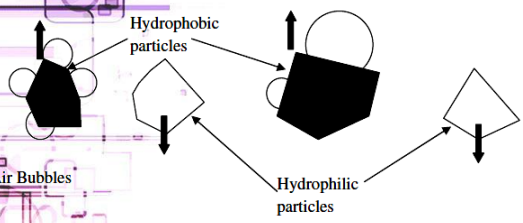
فلوتاسیون



اصول شیمیایی فلوتاسیون

آبرانی و آبدوستی (Hydrophobicity / Hydrophilicity):

فلوتاسیون بر اساس استفاده از خاصیت آبرانی و یا آبدوستی کانیها جهت جداسازی آنها پایه ریزی شده است.



اصول فلوتاسیون

Chemistry Components:
- Collectors
- Frothers
- Activators
- Depressants
- pH

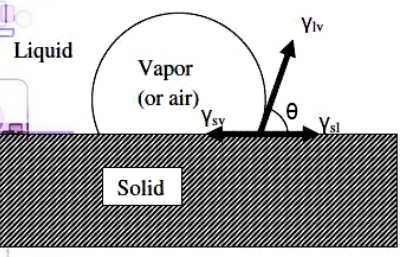
Flotation system

Operation Components:
- Feed Rate
- Mineralogy
- Particle Size
- Pulp Density
- Temperature

Equipment Components:
- Cell Design
- Agitation
- Air Flow
- Cell Bank Configuration
- Cell Bank Control

فلوتاسیون

روش رایج تولید حباب بر روی سطح آزاد کانه و اندازه گیری زاویه تماس به روش عکس برداری است

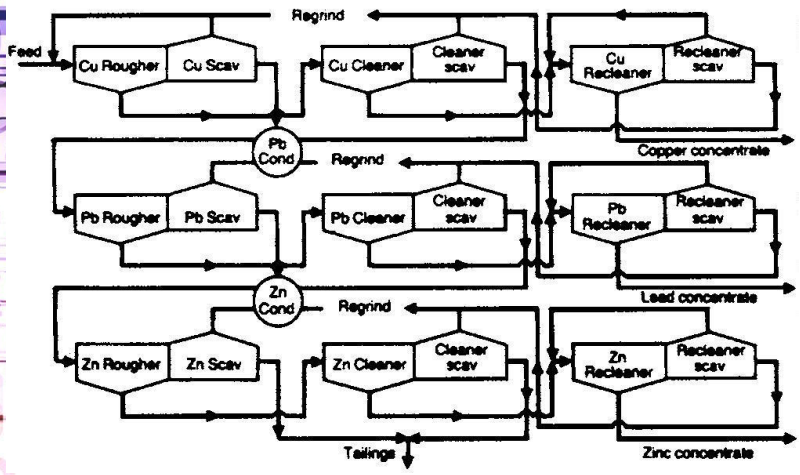


مشکلات اندازه گیری زاویه تماس به این روش:

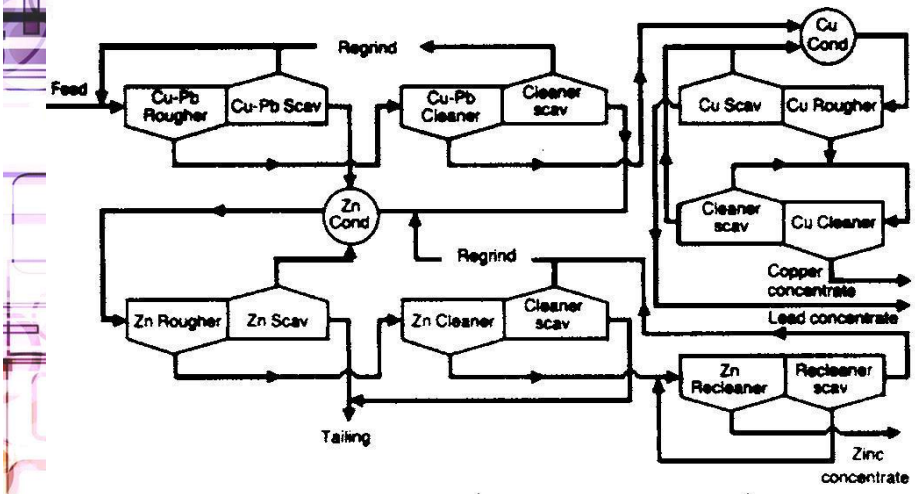
۱- به دست آوردن سطح مورد نیاز کانه بسیار مشکل است

۲- این روش زاویه تماس را به صورت استاتیکی به دست می دهد در صورتی که فرآیند فلوتاسیون دینامیکی است

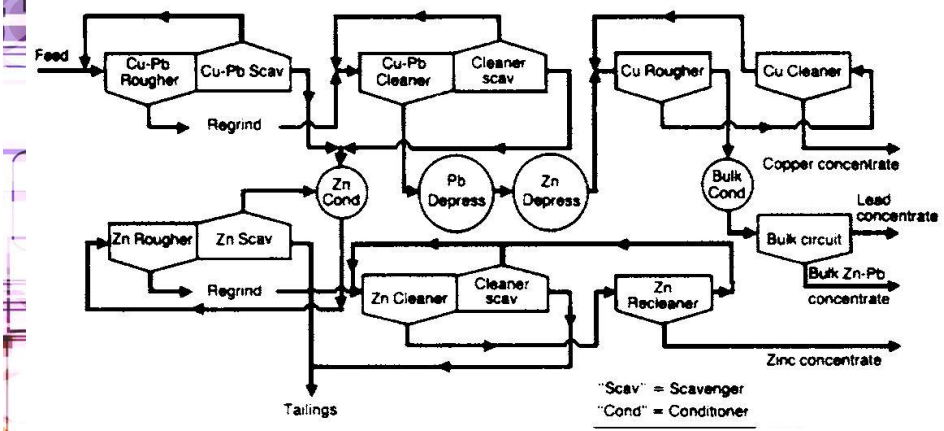
مدارهای فلوتاسیون



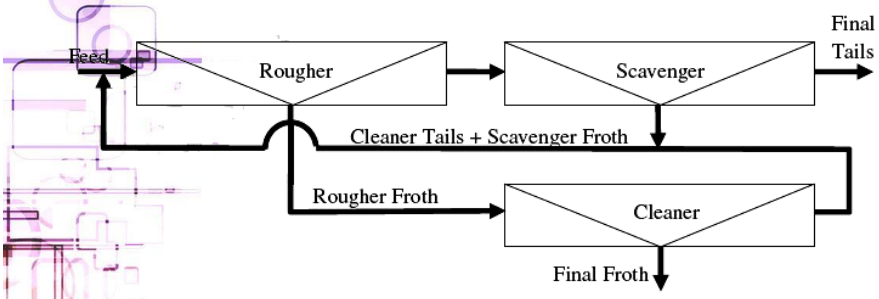
مدارهای فلوتاسیون



مدارهای فلوتاسیون



مدار رایج فلوتاسیون



فلوتاسیون

کلکتور (Collector):

برای چسبیدن کانی مورد نظر به حباب هوا شرط اول آبران بودن آن است. از این رو از کلکتور استفاده می شود. بعضی کانیها به صورت طبیعی آبران هستند (گرافیت، مولیبدن، الماس، ذغال، تالک).

کف ساز (Frother):

ذرات آبران بایستی به حبابهای هوایی که توسط سلول تولید شده اند بچسبند و عمل پایدار کنندگی این حبابها توسط کف ساز ها انجام می شود.

بعد از ایجاد یک حباب پایدار دو پدیده دیگر جهت بازیابی کانی مورد نظر نیاز است:

۱- برخورد:

یعنی برخورد ذره به حباب هوا (وابسته به اندازه ذرات هرچه ذرات کوچکتر احتمال برخورد کمتر)

۲- اتصال:

با وجود حرکت ذره بر روی سطح حباب چسبندگی آن باید حفظ شود.

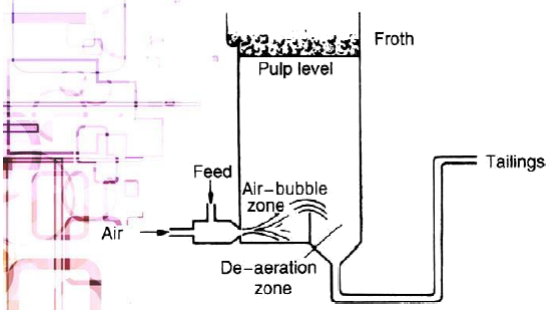
فلوتاسیون

ماشین های فلوتاسیون

به دو دسته تقسیم می شوند: پنوماتیکی و مکانیکی.

سلولهای پنوماتیکی:

- با دمیدن مستقیم هوا به درون جریا ورودی خوراک و پخش شدن توسط بافل و یا با دمیدن هوا از درون سیستم دارای خلل و فرج باعث تولید کف می شوند.
- تولید کنسانتره کم عیار
- مشکلات فرآیندی کم



سلول داوکرا

جهت مرحله رافر و کلینر

فلوتاسیون

یک سلول فلوتاسیون بایستی به صورت همزمان ۴ عمل مهم را انجام دهد:

۱- تامین برقراری رابطه بین هوا و پالپ و نیز اختلاط کامل

۲- نگهداری فصل مشترک ثابت بین کف و پالپ

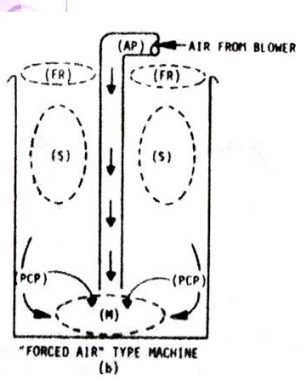
۳- شناور سازی به اندازه ذرات جامد در سلول

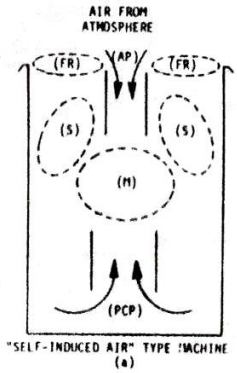
۴- تامین ظرفیت خروج به اندازه کف از سلول

فلوتاسیون

تقسیم بندی سلولهای مکانیکی:

- سلولهای خود القاء
- سلولهای سوپرشارژ

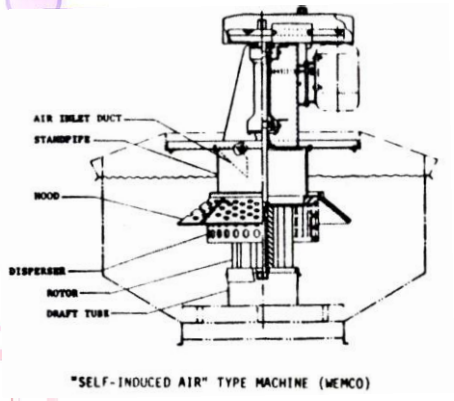


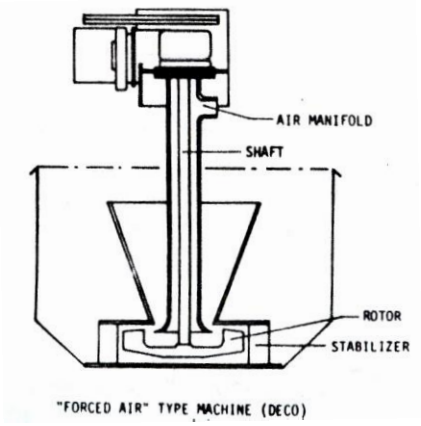


(AP) = AIR PATH
(PCP) = PULP CIRCULATION PATH
(M) = THREE PHASE MIXING ZONE
(S) = FLOTABLE/NON-FLOTABLE SEPARATION REGION
(FR) = FROTH REMOVAL

فلوتاسیون

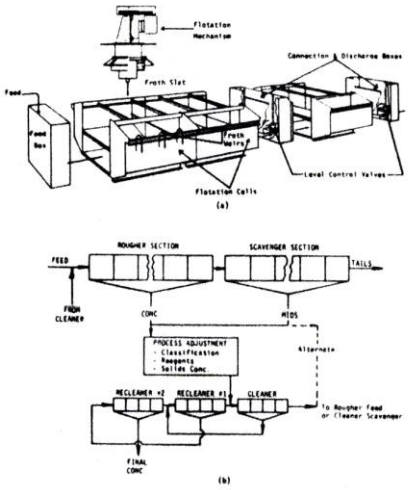
سطح پالپ بایستی به صورت ثابت و غیر متلاطم باشد در غیر این صورت ؟؟؟؟؟
چگونه این شرایط تامین می شود؟؟؟؟؟





فلوتاسیون

سلولها در مسیر معمولاً به صورت سری سلولها قرار می گیرند که توسط Connection box به هم ارتباط دارند:



فلوتاسیون

تعداد سلولها در هر ردیف به پارامترهای زیر بستگی دارد:

۱- سینتیک فلوتاسیون

۲- مسائل اقتصادی

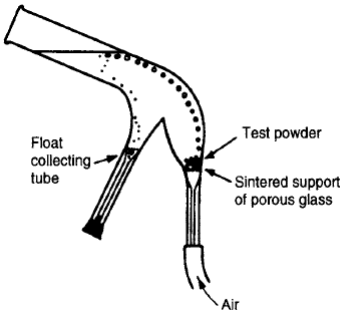
۳- فضای موجود در کارخانه

هر سری از این سلولها وظیفه خاصی دارند:

- Rougher
- Scavenger
- Cleaner
- Re-cleaner

فلوتاسیون: از آزمایشگاه تا کارخانه

روش Hallimond tube:



سلول فلوتاسیون آزمایشگاهی:

فلوتاسیون: از آزمایشگاه تا کارخانه

انجام صحیح تست فلوتاسیون آزمایشگاهی منوط به در نظر گرفتن نکات مهمی است، مانند؟

بعد از انجام مطالعات آزمایشگاهی نیاز به انجام تست های پایلوت جهت دستیابی به پارامترهای تکنیکی برای احداث کارخانه فرآوری است.

دلیل احداث یک پایلوت؟

مهمترین اطلاعاتی که تستهای آزمایشگاهی و پایلوت در اختیار مهندس فرآوری قرار می دهند؟

نمودار بازیابی زمان

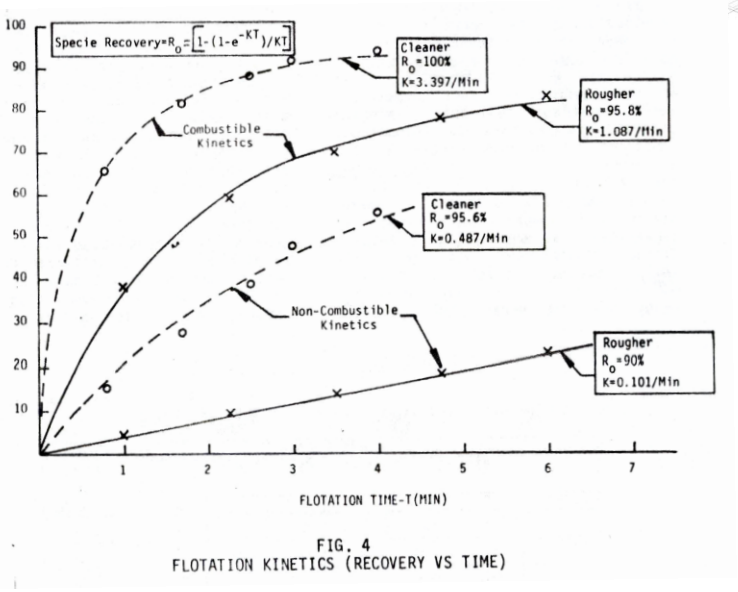


FIG. 4
FLOTATION KINETICS (RECOVERY VS TIME)

فلوتاسیون

تهیه نمودار عیار بازیابی

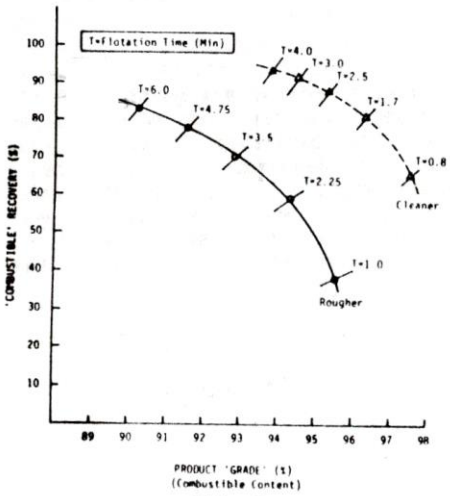


FIG. 5
FLOTATION KINETICS
(Recovery-Grade-Time Relationships)

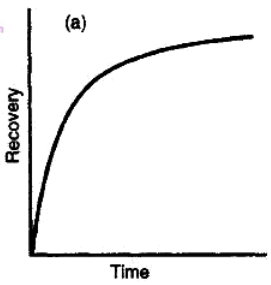
طراحی مسیرهای فلوتاسیون

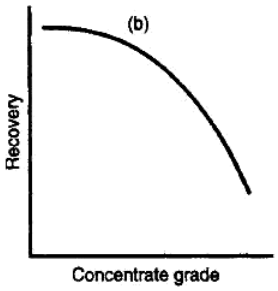
جهت طراحی بهترین مسیر فلوتاسیون اولین پارامتر موثر اندازه ذرات است. دلیل آین است که فلوتاسیون از درجه آزادی ذرات تاثیر می پذیرد.

بنابراین نیاز به تعیین اندازه بهینه ذرات ورودی است.

هدف: تجربیات، تعیین درجه آزادی و تعیین بازیابی اقتصادی.

روش: بدست آوردن نمودارهای بازیابی – زمان و عیار بازیابی.





فلوتاسیون

بیشتر مواد قابل شناور شدن در زمانهای اولیه شناور می شوند.

$$v = -dW/dt = K_n W^n$$

$$R = 1 - \exp(-kt)$$

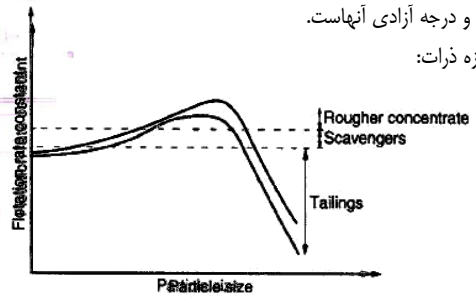
اما این رابطه تقریب دستی ندارد و رسم $\ln(1\text{-}R)$ نسبت به زمان خطی نیست (چرا؟) و رابطه اصلاح شده به صورت زیر تبدیل شد:

$$R = RI[1 - \exp(-kt)]$$

مقدار RI حداکثر مقدار بازیابی تئوری فلوتاسیون است

ثابت نرخ فلوتاسیون وابسته به اندازه ذرات و درجه آزادی آنهاست.

تغییرات ثابت نرخ فلوتاسیون بر حسب اندازه ذرات:



فلوتاسیون

اولین گام در تعیین اندازه ماشین های فلوتاسیون در سایز صنعتی تعییت ضرایب سینتیک فلوتاسیون است.

تعیین زمان ماند و زمان ماند موثر:

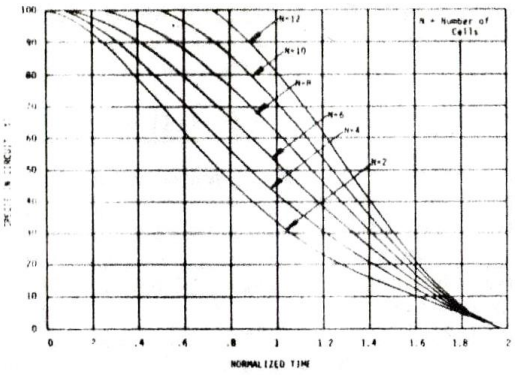


FIG. 6
PULP RESIDENCE TIME CHARACTERISTICS

فلوتاسیون

به نظر شما T(theo) چگونه محاسبه می شود؟

Number Cells in Row	T(eff)/T(theo) Flotation Kinetics Coef. K (1/min)						
	4	3	2	1	.7	.3	<=0.1
3	.715	.740	.780	.840	.865	.910	.925
4	.720	.755	.800	.870	.900	.950	.975
6	.730	.770	.825	.910	.950	1.00	1.00
8	.770	.810	.860	.955	1.00	1.00	1.00
10	.840	.880	.940	1.00	1.00	1.00	1.00

تبدیل نتایج آزمایشهای پیوسته به سایز صنعتی از دو نظر مشکل است:

۱- مدل کردن شرایط هیدرودینامیکی و مکانیزم ذرات در یک سلول کوچک ناپیوسته بسیار سخت است

۲- ایجاد مدار کوتاه برای ذرات غیر ممکن است و مدل بیان کننده حالت واقعی کارخانه نیست

فلوتاسیون

طراحی یک مسیر فلوتاسیون:

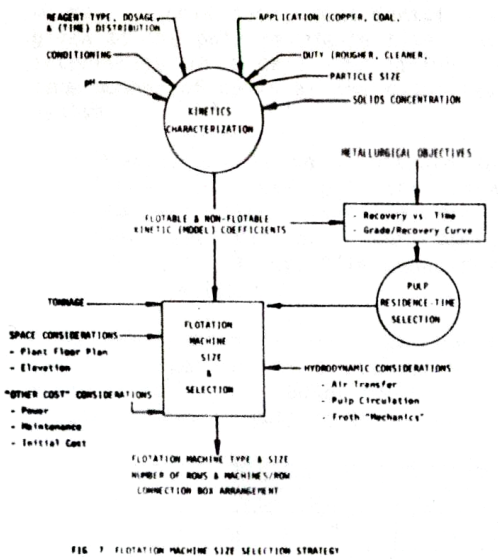


FIG. 7
FLOTATION MACHINE SIZE SELECTION

فلوتاسیون

برای به دست آوردن سینتیک فلوتاسیون نیاز به انجام تست های آزمایشگاهی است.

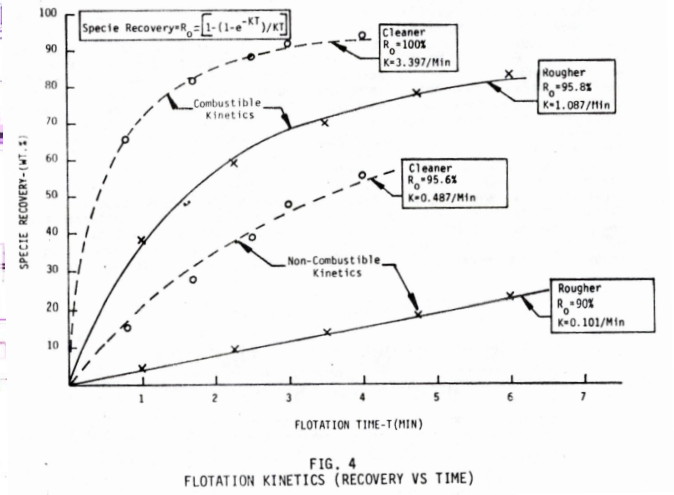


FIG. 4
FLOTATION KINETICS (RECOVERY VS TIME)

فلوتاسیون

و استفاده از نتایج نشان آزمایشگاه و اعمال ضریب تصحیح در به دست آوردن ضریب سینتیک فلوتاسیون در شرایط کارخانه (تقسیم ضریب سینتیک به دست آوه در آزمایشگاه بر عدد ۲،۵)

DUTY	ORIGINAL BATCH TEST KINETICS				MOD. KINETICS FOR MACHINE SIZING			
	FLOTABLE		NON-FLOTABLE		FLOTABLE		NON-FLOTABLE	
	R_o	K'	R_o	K'	R_o	K	R_o	K
ROUGHER	95.8	2.718	90	0.2525	95.8	1.087	90	0.101
CLEANER	100	8.493	95.6	1.2175	100	3.397	95.6	0.487

÷2.5

در روش دیگر به معادلات سینتیک رجوع کرده و از محاسبات انجام شده آزمایش را جهت تعیین مقدار دقیق سینتیک فلوتاسیون انجام می دهیم.

محاسبه پارامترهای فرآیندی فلوتاسیون

Separation efficiency (S.E.) $= Rm - Rg$ (1.1) where Rm = % recovery of the valuable mineral, Rg = % recovery of the gangue into the concentrate.

$$Rm = \frac{100Cc}{f}$$

Therefore, $Rg = C\times$ gangue content of concentrate/gangue content of feed: $= \frac{100C(m-c)}{(m-f)}$

$$Rm - Rg = \frac{100Cc}{f} - \left\{\frac{100C(m-c)}{(m-f)}\right\} = \frac{100Cm(c-f)}{(m-f)f} \qquad (1.3)$$

چه زمانی مقدار SE ماکزیمم است؟

$$\frac{dSE}{dt} = \frac{100m}{f(m-f)}\left[(c-f)\frac{dC}{dt} + C\frac{dc}{dt}\right] \quad (12.36) \quad = 0 \quad \text{at maximum separation efficiency.}$$

بنابراین:

$$\frac{d(Rm-Rg)}{dt} = 0, \quad \text{i.e. when} \quad \frac{dRm}{dt} = \frac{dRg}{dt}$$

محاسبه پارامترهای فرآیندی فلوتاسیون

معادله تغییر یافته نهایی به دلیل تفاوتهای آزمایشگاه و مقیاس واقعی فاکتور b اعمال شده است.

$$R = RI\{1-\exp[-k(t+b)]\}$$

رسم $\ln[(RI-R)/RI]$ نسبت به $(t+b)$ بایستی منجر به خط راست با زاویه $-k$ شود ولی جهت رسم مقادیر RI و b نامعلوم هستند.

نتایج آزمایشگاهی در این مورد استفاده می شود. یعنی آزمایش شماره q با مقادیر RI و b معلوم مقدار r_b برابر خطای آزمایشگاهی به دست می آید:

$$\ln\left(\frac{RI-R_q}{RI}\right)+k(t_q+b)=r_q \longrightarrow$$

$$r_q^2=\left[\ln\left(\frac{RI-R_q}{RI}\right)\right]^2+k^2(t_q+b)^2+2k(t_q+b)\cdot\ln\left(\frac{RI-R_q}{RI}\right)$$

محاسبه پارامترهای فرآیندی فلوتاسیون

و برای n آزمایش:

$$\sum_{q=1}^{n} r_q^2=\sum_{q=1}^{n}\left[\ln\left(\frac{RI-R_q}{RI}\right)\right]^2+k^2\sum_{q=1}^{n}t_q{}^2+nk^2b^2+2k^2b\sum_{q=1}^{n}t_q+2k\sum_{q=1}^{n}\left[t_q\cdot\ln\left(\frac{RI-R_q}{RI}\right)\right]$$

$$+2kb\sum_{q=1}^{n}\ln\left(\frac{RI-R_q}{RI}\right) \qquad (12.41)$$

مقدار $\sum_{q=1}^{n} r^2$ کمینه است اگر دو مقدار زیر صفر باشند:

$$\frac{\partial}{\partial k}\left(\sum_{q=1}^{n}r^2\right) \qquad \frac{\partial}{\partial b}\left(\sum_{q=1}^{n}r^2\right) \longrightarrow$$

$$\frac{\partial}{\partial k}\left(\sum_{q=1}^{n}r^2\right)=2k\sum_{q=1}^{n}t^2+2nkb^2+4kb\sum_{q=1}^{n}t+2\sum_{q=1}^{n}\left[t\cdot\ln\left(\frac{RI-R}{RI}\right)\right]$$

$$+2b\sum_{q=1}^{n}\ln\left(\frac{RI-R}{RI}\right)=0 \quad (12.42)$$

محاسبه پارامترهای فرآیندی فلوتاسیون

$$\frac{\partial}{\partial b}\left(\sum_{q=1}^{n} r^2\right) = 2nk^2b + 2k^2\sum_{q=1}^{n} t + 2k\sum_{q=1}^{n}\ln\left(\frac{RI-R}{RI}\right) = 0 \quad (12.43)$$

با حل دو رابطه 12.42 و 12.43 مقادیر k و b به دست می آید:

$$\hat{k} = -\frac{\left\{n\sum_{q=1}^{n} t\cdot\ln\left[(RI-R)/RI\right]\right\}}{n\sum_{q=1}^{n} t^2 - \left(\sum_{q=1}^{n} t\right)^2} - \frac{\left\{\sum_{q=1}^{n}\ln\left[(RI-R)/RI\right]\cdot\sum_{q=1}^{n} t\right\}}{n\sum_{q=1}^{n} t^2 - \left(\sum_{q=1}^{n} t\right)^2} \quad (12.44)$$

$$\hat{b} = -\frac{\left\{\hat{k}\sum_{q=1}^{n} t + \sum_{q=1}^{n}\ln\left[(RI-R)/RI\right]\right\}}{n\hat{k}} \quad (12.45)$$

محاسبه پارامترهای فرآیندی فلوتاسیون

برای محاسبه نهایی مقدار RI معادل ۱۰۰ در نظر گرفته می شود و مقادیر $\hat{k},\ \hat{b}$ محاسبه شوند و مقدار دقیق $\sum_{q=1}^{n} r^2$ محاسبه می شود و بعد از آن مقادی کمتر از ۱۰۰ برای RI در نظر گرفته می شود تا مقدار $\sum_{q=1}^{n} r^2$ کمینه شود و این مقدار نشان دهنده RI مورد نظر است.

از طرف دیگر

$$\frac{d(Rm-Rg)}{dt} = 0, \quad \text{i.e. when} \quad \frac{dRm}{dt} = \frac{dRg}{dt}$$

$$dR/dt = RI\cdot k\exp\left[-k\,(t+b)\right]$$

$$RI_m k_m\cdot\exp\left[-k_m\,(t+b_m)\right] = RI_g k_g\cdot\exp\left[-k_g\,(t+b_g)\right]$$

زمان بهینه فلوتاسیون:

$$= \left[\ln\frac{RI_m k_m}{RI_g k_g} - k_m b_m + k_g b_g\right] \Big/ \left(k_m - k_g\right) \quad (12.46)$$

فلوتاسیون

ضریب سینتیک فلوتاسیون را در نتایج پایلوت که قبلاً انجام شده است نیز می توان یافت

MINERAL	DUTY	LETTER DESIGNATION
Coal	Rougher	Ar
	Cleaner	Ac
Copper	Rougher	Cr
	Cleaner	Cc
	Recleaner	Crc
Molybdenum	Rougher	Mr
	Cleaner	Mc
Iron	Rougher	I
Phosphate	Rougher	Ph
Phosphate	Rougher	Pr
	Scavenger	Ps
Lead	Rougher	L
Zinc	Rougher	Z

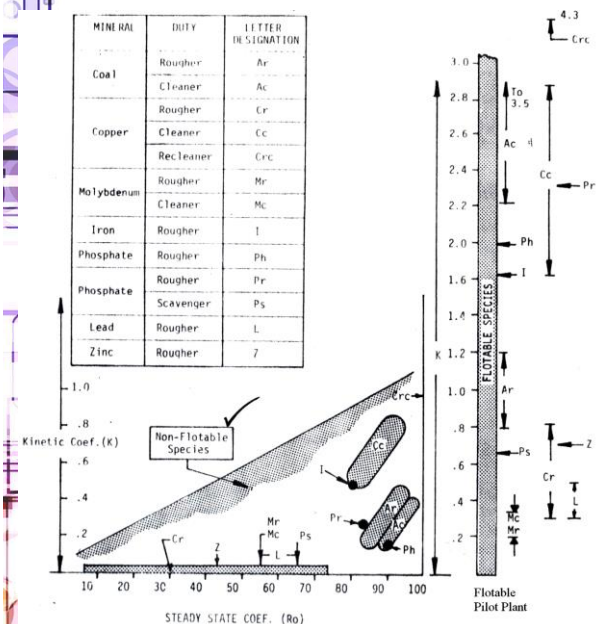


FIG 8 MINERAL FLOTATION KINETICS SUMMARY

فلوتاسیون

مثال زیر را در نظر بگیرید:

TABLE 2
FLOTATION MACHINE SIZE SELECTION
(EXAMPLE)

- APPLICATION = COAL (ASH REDUCTION)
- DUTY:
  - ROUGHER
  - CLEANER
- FEED (DRY) = 3859 MTPD
- FEED ASH CONTENT = 28 (WT. %)
- PERFORMANCE OBJECTIVES:
  - PRODUCT ASH CONTENT = 6.5 (WT. %) MAX.
  - COMBUSTIBLE RECOVERY = MAX. @ 6.5% PROD. ASH OPT. ECONOMIC PAYBACK
- PLANT DESIGN LIMITS:
  - ROUGHER ROW LENGTH = 22.86 METER OVERALL
  - CLEANER ROW LENGTH = 16.76 METER OVERALL
- ECONOMIC EVALUATION ASSUMPTIONS:
  (1) COAL VALUE TO PRODUCER:
  - $25/DRY TON @ 12% ASH
  - $30/DRY TON @ 6.5% ASH
  (2) COST OF MONEY = 11%/ANNUM
  (3) PRODUCTION HOURS PER MONTH = 480
  (4) MACHINE INSTALLATION COST = MACHINE COST.
- LAB (BATCH) FLOTATION TEST DATA

ROUGHER TEST (@ 12% SOLIDS)

TIME (min)	SPECIE RECOVERY (%) COMBUSTIBLE	NON-COMBUSTIBLE
0.4	38	4.5
0.9	59	9.1
1.4	70	13.8
1.9	78	18.4
2.4	83	23

CLEANER TEST (@ 6% SOLIDS)

TIME (min)	SPECIE RECOVERY (%) COMBUSTIBLE	NON-COMBUSTIBLE
0.32	65.8	15
0.68	81.4	27.8
1.00	88.0	38.7
1.2	91.5	47.8
1.6	93.7	55.6

فلوتاسیون

DUTY	ORIGINAL BATCH TEST KINETICS				MOD. KINETICS FOR MACHINE SIZING			
	FLOTABLE		NON-FLOTABLE		FLOTABLE		NON-FLOTABLE	
	R_O	K'	R_O	K'	R_O	K	R_O	K
ROUGHER	95.8	2.718	90	0.2525	95.8	1.087	90	0.101
CLEANER	100	8.493	95.6	1.2175	100	3.397	95.6	0.487

÷2.5

فلوتاسیون

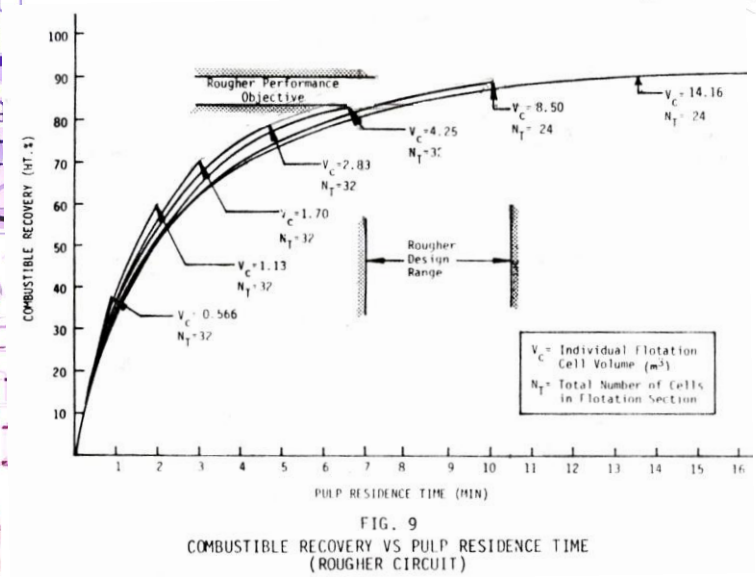


FIG. 9
COMBUSTIBLE RECOVERY VS PULP RESIDENCE TIME
(ROUGHER CIRCUIT)

فلوتاسیون

TABLE 3
FLOTATION MACHINE SUMMARY
(TYPICAL)

MACHINE SIZE (M^3)	FLOOR AREA (M^2)	MACHINE LENGTH (M)	MACHINE CLEARANCE HEIGHT* (M)	MECH. POWER (WATER) (HP)	REL. COST ($/(M^3)	NO. CELLS BETWEE CON. B
1.7	2.55	1.37	0.88	4.5	1.14	8/10
2.83	3.00	1.52	1.04	6.6	1.00	8
4.25	3.42	1.83	1.11	10	0.84	6
8.5	6.97	2.29	1.37	18	0.55	5/6
14.2	10	2.74	1.51	26.7	0.45	4/5
28.3	12.6	3.05	1.93	48.3	0.38	3/4
42.5	17.3	3.57	2.14	82.7	0.32	3

فلوتاسیون

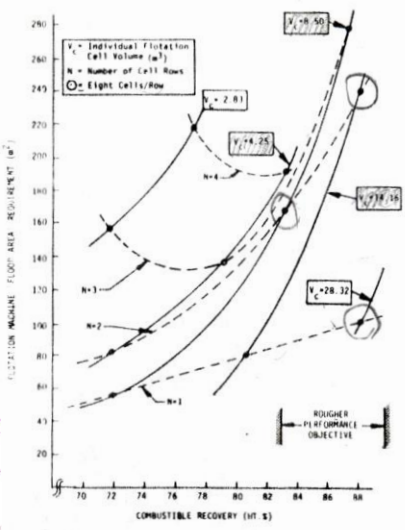


FIG. 10
FLOTATION MACHINE FLOOR SPACE REQUIREMENTS
(Rougher Circuit)

فلوتاسیون

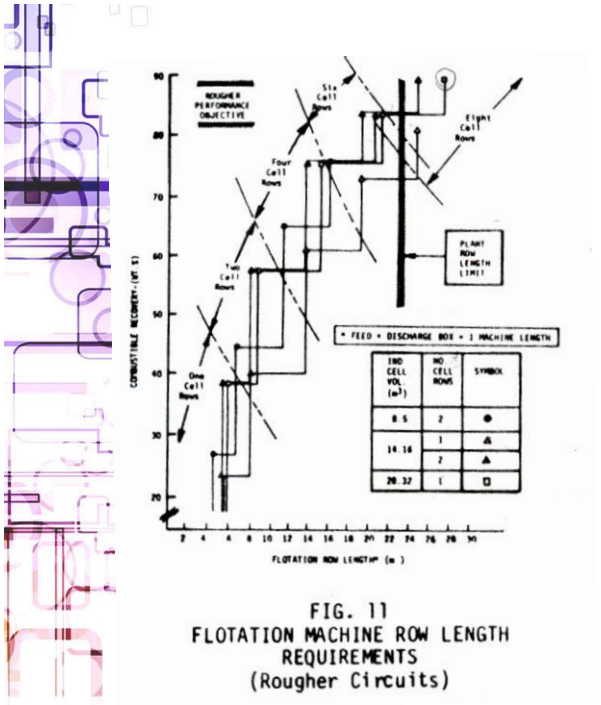


FIG. 11
FLOTATION MACHINE ROW LENGTH
REQUIREMENTS
(Rougher Circuits)

فلوتاسیون

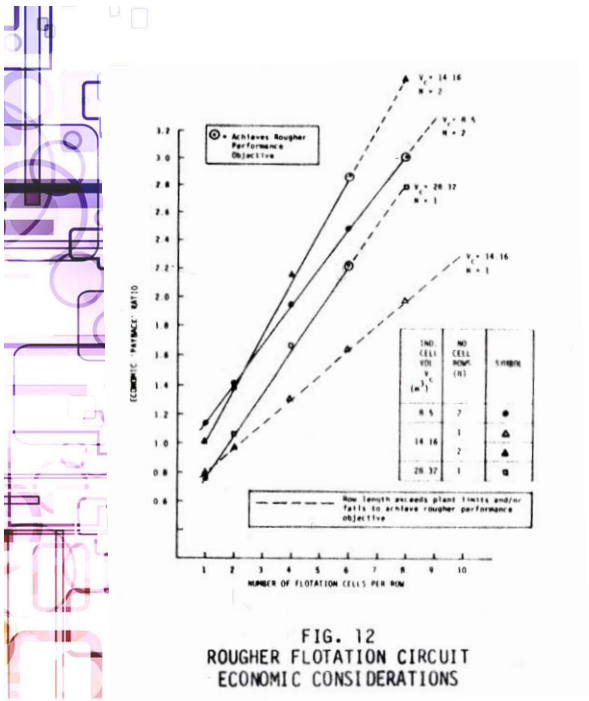


FIG. 12
ROUGHER FLOTATION CIRCUIT
ECONOMIC CONSIDERATIONS