

افزایش راندمان يك بستر ساچمه‌ای در اثر امواج آکوستیکی

اصغر صدیق زاده

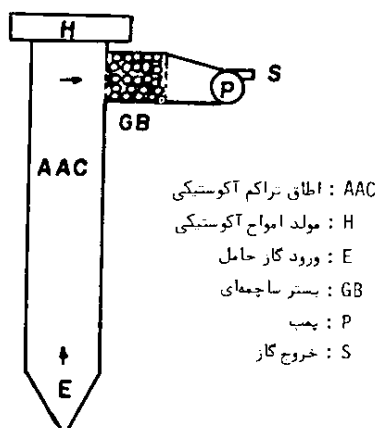
امور حفاظت در برابر اشعه

سازمان انرژی اتمی ایران

چکیده

در این مقاله نشان داده شده است که امواج آکوستیکی تاثیر قابل ملاحظه‌ای در به دام انداختن ذرات آئروسول در بسترهای ساچمه‌ای دارند. این اثر بستگی زیادی به فرکانس، شدت موج آکوستیکی و اندازه ذره آئروسول دارد. برای یک آئروسول با قطر مشخص یک آستانه شدت موج آکوستیکی وجود دارد که بعد از آن راندمان بستر به سرعت افزایش می‌یابد.

می‌چسبند و از گاز حامل جدا می‌شوند. مقدار انعقاد و نشست آکوستیکی بستگی زیادی به فرکانس و شدت موج آکوستیکی، غلظت و قطر متوسط ذرات در ورود به فیلتر دارد. این مقاله تنها به بالا رفتن راندمان یک بستر ساچمه‌ای زیر نفوذ امواج آکوستیکی اختصاص دارد.



شکل ۱- شمای یک فیلتر آکوستیکی

مقدمه

در برخی از صنایع پیشرو مانند صنایع اتمی، شیمیایی و...، برای جداسازی ذرات آئروسول از یک گاز احتیاج به فیلتری است که بتواند در برابر فشار و حرارت زیاد مقاومت داشته باشد. یک فیلتر آکوستیکی می‌تواند جوابگوی موارد ذکر شده باشد. بعلاوه اثر گازهای خورنده بر روی این فیلترها ناچیز بوده و داشتن افت فشار کم و ارزان بودن از محاسن دیگر این فیلترها است. این فیلتر از یک اتاق تراکم آکوستیکی

(acoustic agglomeration chamber) و یک بستر ساچمه‌ای تشکیل شده است (شکل ۱). گاز حامل قبل از ورود به بستر ساچمه‌ای از اتاق تراکم عبور می‌کند. در داخل این اتاق قطر متوسط ذرات در اثر انعقاد آکوستیکی بالا می‌رود و تعداد آنها در واحد حجم (غلظت) کم می‌شود. قسمتی از این ذرات در اثر رسوب آکوستیکی (acoustic precipitation) به دیوار اتاق تراکم

۱. صدیق‌زاده. افزایش راندمان يك بستر ساچمه‌ای در اثر امواج آکوستیکی.

$$\eta_{Int} = 16 R^2 - Re / (Re^{1/3} + 1)^3 \quad (5)$$

$$\eta_S = \frac{G}{1 + G} \quad (6)$$

$$\eta_D = 8 Pe^{-2/3} \text{ for } Re \rightarrow 0 \quad (7)$$

$$\eta_D = 2.1 Pe^{-1/2} \text{ for } Re \rightarrow \infty \quad (8)$$

در رابطه ۴:

$(St = C \rho_p D_p^2 U_i / 9 \eta_g D_s) St, (\alpha = 1 - \epsilon) \alpha$
 St_{eff} و $Re = D_s U_i / \nu$ به ترتیب نسبت جامد
 بستر ساچمه‌ای، عدد استوکس (stokes number)،
 عدد استوکس موثر و عدد رینولدز (Reynolds
 number) مربوط به یک ساچمه هستند. علائم
 $\eta_g, U_i, (\nu/\epsilon), D_p, \rho_p, C$ و ν در عبارات
 مذکور به ترتیب ویسکوزیته دینامیکی گاز حامل،
 سرعت میانین جریان، قطر یک ذره آئروسول، جرم
 حجمی ذره و ضریب تصحیح کانینگ هام و ویسکوزیته
 گاز حامل هستند. در عبارات راندمانهای جمع‌آوری
 مستقیم، رسوب گرانشی و پخش، $R = D_p/D_s$ ،
 $G = C \rho_p D_s^2 g / 18 \eta_g U_i$ و $Pe = D_s U_i / D_B$
 به ترتیب پارامترهای برخورد مستقیم، رسوب
 گرانشی و عدد پکلت (Peclet number) هستند.
 علائم $g, D_B = CK_B T / 3 \pi \eta_g D_p$ و K_B و T
 به ترتیب نشانگر شتاب گرانشی، ضریب پخش براون،
 ثابت بولتزمن و حرارت هستند.

اثرات امواج آکوستیکی بر روی

راندمان یک بستر ساچمه‌ای

امواج آکوستیکی عامل بوجود آمدن نسروه‌های
 سوق (drift force)، نلاطم آکوستیکی
 (acoustic turbulence) و بالاخره نوسان
 آئروسولها و مولکولهای گاز حامل می‌باشند (۴).

بررسی نظری

راندمان یک بستر ساچمه‌ای E بسویله رابطه ۱
 (۱) محاسبه می‌شود، که در آن ϵ و L به ترتیب
 میزان تخلخل و ضخامت بستر ساچمه‌ای هستند.
 D_s و η_t به ترتیب قطر و راندمان هر یک از ساچمه‌های
 تشکیل‌دهنده بستر می‌باشند.

$$E = 1 - \exp\left(-\frac{3(1-\epsilon)L}{2\epsilon D_s} \eta_t\right) \quad (1)$$

در محاسبات، اثرات نیروهای الکتروستاتیکی بر
 روی راندمان و همچنین بر هم‌کنش بین مکانیسمهای
 مختلف دام اندازی یک ذره بر روی یک ساچمه
 نادیده گرفته می‌شود. در نتیجه راندمان یک ساچمه
 کروی شکل η_t ، حاصل جمع چهار راندمان است که
 نتیجه چهار مکانیسم دام اندازی ذرات آئروسول
 می‌باشد. در رابطه فوق $\eta_D, \eta_I, \eta_{Int}$ و η_S به
 ترتیب راندمانهای جمع‌آوری براونی (brownian
 collection) یا پخش (diffusion)،
 اینرسی (impaction inertia)، برخورد
 مستقیم (direct impaction) و رسوب گرانشی
 (sedimentation) توسط یک ساچمه کروی شکل
 هستند.

$$\eta_t = \eta_D + \eta_I + \eta_{Int} + \eta_S \quad (2)$$

برای محاسبه راندمان یک ساچمه کروی شکل
 نزدیکترین تئوری به این نتایج آزمایشگاهی، تئوری
 اوتانی و همکاران است (۱ و ۲). روابط ۳ تا ۸
 دام اندازی ذرات آئروسول توسط یک ساچمه را که
 توسط اوتانی و همکاران ارائه شده نشان می‌دهد.

$$\eta_I = \frac{(St_{eff})^3}{0.014 + (St_{eff})^3} \quad (3)$$

که در آن:

$$St_{eff} = \left(1 + \frac{1.75 Re (1 - \alpha)}{150 \alpha}\right) St \quad (4)$$

آکوستیکی یک ساچمه کروی شکل می‌باشد.

$$\eta_T = \eta_t + \eta_a \quad (11)$$

وسایل و روشها

بستر ساچمهای از ساچمه‌های کروی شکل هم اندازه شیشمای تشکیل شده که در داخل یک لوله پیرکسی به قطر ۶/۷ cm جا گذارده شده است (شکل ۲). ضخامت بسترهای ساچمهای بکار رفته در آزمایشهای تجربی ۱۰ cm و ۱۵ cm می‌باشد که به ترتیب از ساچمه‌هایی به قطر ۱mm و ۲mm تشکیل یافته‌اند. غلظت آئروسولها قبل از ورود به بستر و بعد از عبور از آن بوسیله یک شمارنده هسته تراکم (condensation nuclei counter) و یا یک شمارنده اپتیکی ذرات (optical particle counter) اندازه‌گیری می‌شود.

آئروسولهای تک توزیعی (هم شکل، هم اندازه و هم جنس) (monodisperse aerosols) بکار رفته در آزمایشهای مختلف، دی اکتیل سبات (dioctyl sebacate) و دی اکتیل پتالت (dioctyl phthalate) می‌باشند که به ترتیب با یک مولد آئروسول (aerosol generator) نوع MAGE و یا یک مولد TSI (مدل ۳۰۷۶ و ۳۰۷۲) تولید می‌شوند. سیستم رقیق‌کننده طراحی و ساخته شده در این آزمایشگاه (صدیق‌زاده، ۱۳۶۶) امکان می‌دهد که غلظت ذرات آئروسول را پائین آورده و مقدار آنرا در مدت یک آزمایش ثابت نگاه دارد.

یک علامت الکتریکی سینوسی (sinusoidal electric signal) بوسیله مولد برق تولید می‌شود، این علامت قبل از تغذیه بلندگو بوسیله یک تقویت‌کننده صوتی (audio-amplifier) تقویت می‌شود. شکل و توان علامت برقی که به بلندگو داده می‌شود بوسیله یک نوسان نگار

نیروهای سوق باعث حرکت عرضی (transversal motion) آئروسولها به موازات جهت انتشار موج آکوستیکی و یا در جهت مخالف آن می‌شوند. میزان شرکت آئروسولها در ارتعاشات آکوستیکی توسط پارامتر μ_p تعیین می‌شود.

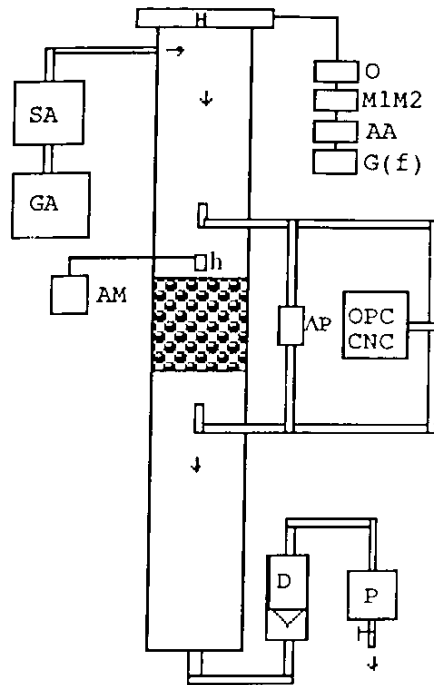
$$\mu_p = \frac{A_p}{A_g} = \frac{1}{(1 + \omega^2 \tau^2)^{0.5}} \quad (9)$$

در این رابطه τ و ω به ترتیب زمان سکون (relaxation time) ذره و فرکانس زاویه‌ای موج آکوستیکی هستند. A_p ، A_g به ترتیب دامنه نوسان آکوستیکی ذره و مولکولهای گاز حامل هستند. اگر $\omega \tau \gg 1$ باشد یعنی اینرسی ذره آئروسول زیاد بوده و در این حالت A_p یا دامنه نوسان تقریباً برابر صفر است و در نتیجه ذره به حرکت اولیه خودش مستقل از امواج آکوستیکی ادامه می‌دهد. اگر $\omega \tau \ll 1$ باشد در این حالت دامنه نوسان ذره برابر با دامنه نوسان مولکولهای گاز حامل است ($A_p \approx A_g$). از شدت آکوستیکی ۱۵۸ dB به بالا تلاطم آکوستیکی به حدی می‌رسد که عامل نیروی محرک دیگری برای خارج کردن ذرات از خط جریانشان (streamline) می‌شود و در نتیجه باعث نزدیک شدن و چسبیدن ذرات بر روی ساچمه‌های بستر می‌شود (۵). شدت توربولانس بوسیله مقدار انرژی پخش شده در واحد زمان و جرم ϵ_d در محیط مشخص می‌شود. برای یک موج پیشرونده (traveling wave)، ϵ_d را بوسیله رابطه زیر محاسبه می‌کنند.

$$\epsilon_d \approx \frac{I^{3/2} f}{\rho_g^{3/2} c^{5/2}} \quad (10)$$

راندمان یک بستر ساچمهای با وجود امواج آکوستیکی (η_T) به صورت زیر نوشته می‌شود. η_a راندمان

۱. صدیق‌زاده. افزایش راندمان یک بستر ساچمه‌ای در اثر امواج آکوستیکی.



- AA - تقویت کننده صوتی
- AM - دستگاه اندازه گیری شدت موج آکوستیکی
- CNC - شمارنده هسته تراکم
- D - دیپتر
- GA - مولد آئروس
- G(f) - مولد جریان سینوسی
- H - بند تو
- h - میکروفون
- M1M2 - آمپر متر. وت متر
- O - نوسان نگار
- OPC - شمارنده اپتیکی ذرات
- P - پمپ
- SD - رقیق کننده
- AP - فشار سنج

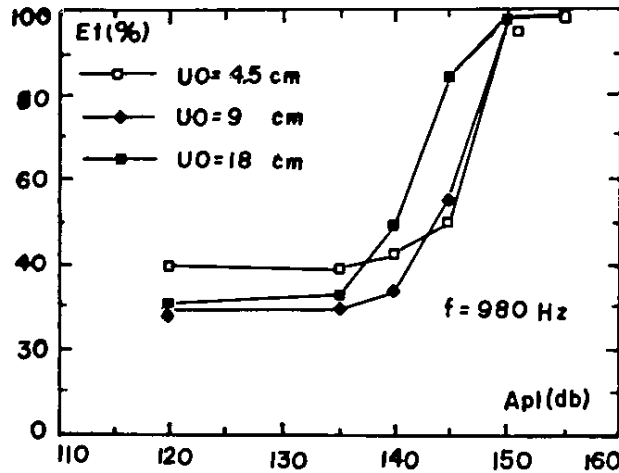
شکل ۲- شمای سیستم تجربی

۱ mm تشکیل شده است. سرعت جریان گاز حامل قبل از ورود به بستر در این آزمایشها به ترتیب 9 cm/s ، $4/5 \text{ cm/s}$ و 18 cm/s است. قطر آئرو- سلهای دی اوکنیل سیاست بکار رفته در این آزمایشها به ترتیب $2 \mu\text{m}$ ، $3/3 \mu\text{m}$ و $4 \mu\text{m}$ می باشد. فرکانس امواج آکوستیکی استعمال شده به ترتیب 450 Hz ، 980 Hz و 1590 Hz می باشد. این فرکانسها، فرکانسهای بازآوایی (frequency of resonance) دستگاه تجربی ما هستند، که در آن تولید امواج آکوستیکی با شدت ماکزیمم می کنند. برای فرکانسهای مذکور شدت امواج آکوستیکی را بین $120 - 165 \text{ dB}$ تغییر می دهیم. برای مثال شکل ۳، افزایش راندمان یک بستر ساچمه‌ای $(L = 10 \text{ cm}, D_s = 1 \text{ mm}, \epsilon = 1/4)$ را درازا، شدت

(oscilloscope) و دو مالتی متر (multi-meter) اندازه گیری می شوند. یک فشار سنج (pressure manometer) جهت اندازه گیری افت فشار در بستر در حضور و عدم حضور امواج آکوستیکی بکار می رود.

یافته‌ها و بررسی آنها

برای بررسی پیش‌بینی‌های نظری چند سری تجربیات آزمایشگاهی برای اندازه گیری راندمان بسترهای ساچمه‌ای با وجود و بدون وجود امواج آکوستیکی برای قطرهای مختلف ذرات آئروسول و سرعتهای مختلف انجام می دهیم. در اولین سری آزمایشها ضخامت بستر ساچمه‌ای بکار رفته 10 cm است که از ساچمه‌های شیشه‌ای کروی شکل به قطر



شکل ۳- افزایش راندمان بستر ساچمهای
($L = 10 \text{ cm}$, $D_s = 1 \text{ mm}$, $\epsilon = 0.4$)
بر حسب شدت موج آکوستیکی

نتایج این بررسیها نشان می‌دهند که افزایش راندمان بستر ساچمهای زیر نفوذ امواج آکوستیکی رابطه مستقیم با شدت آن دارد. اثر امواج آکوستیکی بر روی راندمان یک بستر ساچمهای آنقدر زیاد است که بعد آئروسولها بزرگتر است. مع الوصف به نظر می‌رسد که ماکزیمم این اثر بر روی ذرات به قطر $0.5 \mu\text{m}$ حاصل شود. برای مثال شکل ۴ افزایش راندمان بستر را زیر نفوذ یک موج آکوستیکی که فرکانس آن 0.5 KHz است برای آئروسولهای یک توزیعی به قطر $1 \mu\text{m}$ ، 0.5 ، 0.1 نشان می‌دهد. چنانکه ملاحظه می‌شود اثر امواج بر روی ذرات به قطر $0.1 \mu\text{m}$ به مراتب کمتر از ذرات بزرگتر است. این اثر با افزایش شدت موج افزایش می‌یابد.

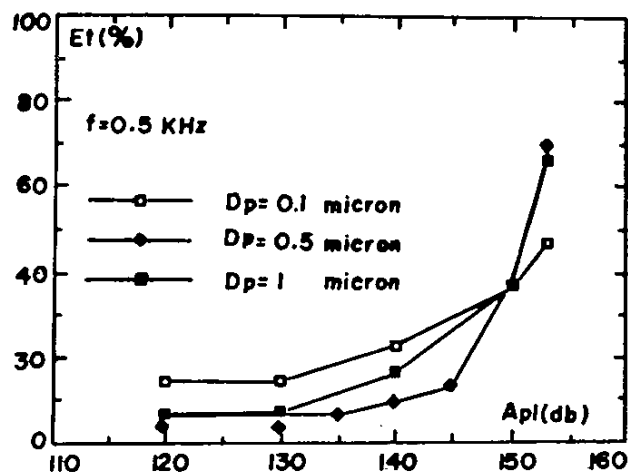
نتیجه‌گیری

بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شده نشان می‌دهد که امواج آکوستیکی که شدت آنها بیشتر از 130 dB باشد باعث بالا رفتن محسوس راندمان یک بستر

موج آکوستیکی که فرکانس آن 980 Hz است برای سه سرعت 4.5 cm/s ، 9 cm/s و 18 cm/s نشان می‌دهد. قطر آئروسولهای تک توزیعی در این آزمایشها $2 \mu\text{m}$ می‌باشد. راندمان کمتر از 25% بدون امواج آکوستیکی به $100\% \approx$ با وجود امواج آکوستیکی که شدت آنها از 155 dB بیشتر باشد می‌رسد. در این شکل مشاهده می‌شود که نقش سرعت جریان گاز حامل در آزمایشهای بعمل آمده ناچیز است. از شدت آکوستیکی 140 dB ($ApI > 140$)، آستانه شدت موج آکوستیکی، افزایش راندمان سریعتر می‌شود.

در آزمایشهای سری بعد افزایش راندمان یک بستر ساچمهای ($L = 15 \text{ cm}$, $D_s = 2 \text{ mm}$, $\epsilon = 0.39$) در ازا شدت موج آکوستیکی که فرکانس آنها 3 KHz ، 2.5 ، 2 ، 1.5 ، 1 ، 0.5 و 0.2 است، برای آئروسولهای برابر و یا زیر یک میکرون ($D_p = 0.1$ ، 0.5 ، $1 \mu\text{m}$) مورد بررسی قرار می‌گیرد. سرعت جریان گاز حامل در این آزمایشها $7/9 \text{ cm/s}$ است.

۱. صدیق‌زاده. افزایش راندمان یک بستر ساچمه‌ای در اثر امواج آکوستیکی.



شکل ۴- افزایش راندمان بستر ساچمه‌ای
($L = 15 \text{ cm}$, $D_s = 2 \text{ mm}$, $\epsilon = 0.39$)
بر حسب شدت موج آکوستیکی

افزایش مخصوصاً "تابع شدت موج و بعد آئروسولها می‌باشد. مثلاً" زیر نفوذ موج آکوستیکی راندمان بستر (شکل ۴) برای ذرات به قطر $0.5 \mu\text{m}$ ، از ۴٪ بدون وجود موج آکوستیکی به ۲۵٪ با وجود موجی که شدت آن 153 dB است می‌رسد که این بیانگر ۱۸ برابر افزایش است.

ساجمه‌ای می‌شوند. این نتایج وجود یک آستانه شدت آکوستیکی را ثابت می‌کند که از آن به بعد افزایش راندمان در اثر امواج آکوستیکی سریعتر می‌شود.

افزایش راندمان یک فیلتر ساچمه‌ای زیر نفوذ امواج آکوستیکی تابع متغیرهای مختلف بستر ساچمه‌ای، آئروسولها و موج آکوستیکی است. این

References

1. T.L. Paretzky-D., Dissertation, The City University of New York (1972).
2. A. Sadigh Zadeh, Filtre Acoustique, Sixieme Journees d'Etudes sur les Aerosols", 45 (1989).
3. Y. Otani, C. Kanaoka and H. Emi, "Experimental Study of Aerosol Filtration by the Granular Bed over a Wide Range of Reynolds Numbers", Aerosol Sci. and Technol. 10, 463 (1989).

4. E.P. Mednikov, "Acoustic Coagulation and Precipitation of Aerosols" New York: Consultants Bureau (1965).
5. A. Sadigh Zadeh, "Etude de l'Efficacite de Captation des Aerosols par un lit Granulaire en l'Absence et en Presence d'Ondes Acoustique" Rapport CEA-R-5552 (1991).

THE EFFICIENCY INCREASE OF A GRANULAR BED CAUSED BY ACOUSTIC WAVES

A. Sadigh Zadeh

National Radiation Protection Department
Atomic Energy Organization of Iran

Abstract

Development of some advanced technology industry requires utilization of high pressure and temperature resistant filters. An acoustic filter has some advantages over traditional filters. First of all, it can be used in the case mentioned above. It resists to corrosive agents and the pressure drop is low. Now, the acoustic filter is composed of an acoustic agglomeration chamber (AAC) and a granular bed (GB). In this paper, the theoretical and experimental investigations of the effects of acoustic field on the collection of aerosols by a granular bed are presented. These studies show that an important increase in the aerosol collection efficiency is obtained at high acoustic intensities ($A_p I > 130$ dB).