مطالعه پدیده تعادل کم ثبات و Nucleation و کاربردهای این موارد

فرشید مردکاری[1]، سیروس آقا نجفی[2]
eng_far_mm@yahoo.com

چکیده

موضوع مورد بحث در ارتباط با پدیده شبه تعادل یا تعادل کم ثبات(Meta stable)، Nucleation و مایعات سوپرهیت (Superheat) و مایعات سوپرکولد (Supercold) که در اثر این پدیده بوجود می‌آیند و برخی از کاربردهای موارد ذکر شده می‌باشد .بطورکلی وضعیت شبه تعادل یا تعادل کم ثبات در سه حالت می‌تواند اتفاق بیفتد که عبارتند از: به هنگام عبور از فاز مایع به فاز بخار در اثر گرم شدن، هنگام گذر از فاز مایع به جامد دراثرسرد شدن و به هنگام حرکت بخار آب در داخل نازل های همگرا و واگرا و یا همگرا که قبل از بوجود آمدن فرآیند چگالش می‌تواند اتفاق بیفتد البته حالتهای اول و دوم بسیار بیشتر از حالت سوم در طبیعت و صنایع مختلف دیده شده است و محصولات کاربردی حاصله از آن دو حالت زیاد می‌باشد البته انحرافات واغتشاشات که درباره آنها توضیح داده خواهد شد می‌تواند این وضعیت را به هم بزند و یا بطور کلی حتی این وضعیت را حذف کند و همچنین روابطی که بدست آمده نشان می‌دهد که درجه سوپرهیت مایع دارای یک مینیمم و یک ماکزیمم مقدار می‌باشد.

کلیدواژه:

پدیده شبه تعادل - هسته زایی - سوپرهیت - سوپرکولد - درجه سوپرهیت

نمادهاوعلائم

فشار	P	فشار بخار تعادل	P_V
دما	T	درجه سوپرهیت	T_{S1}
انرژی گیبس	G	فشار محیط	P_0
کشش سطحی	$\gamma(T)$	میزان هسته زایی	J

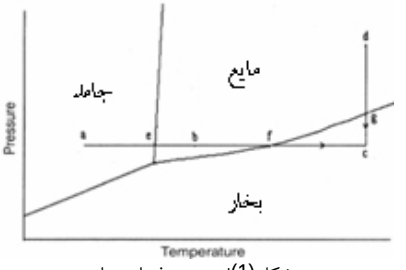
1- مدرس آموزشکده فنی تبریز و آموزشکده آزادعالی سماء ممقان کیلومتر 40 تبریز - آذرشهر
2- دانشیار گروه مکانیک - دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی

1- مقدمه

دانشمندان و محققین علوم مکانیک وشیمی در طی سالیان متمادی بخصوص در نیمه دوم قرن بیستم با مطالعه بر روی تغییرات فازی و گذار از یک فاز به فاز دیگر به واسطه انتقال حرارت که اکثراً به واسطه فرآیندهای جوشش و چگالش که همراه با تولید حباب و تشکیل قطرات بوده، در فرآیندهای مختلف به وجود وضعیت شبه تعادل در هنگام تغییر فاز از مایع به بخار و تغییر فاز از مایع به جامد پی بردند. پدیده ذکر شده هم در فیزیک سایز میکرو و هم ماکرو در فرآیندهای مختلفی دیده شده است و یک تلاش قابل توجهی در بدست آوردن ارتباط نتایج مطالعات صورت گرفته در این زمینه می‌باشد که البته به واسطه پیشرفت‌هایی که به وسیله تکنولوژی‌های جدید در تجهیزات مختلف نظیر اشعه ایکس، ترمومتری Infrared با سرعت زیاد، فرآیند تشدید مغناطیس هسته (NMR)، پرتونگاری نوترون، انتقال حرارت از طریق میکروتیوب‌ها و غیره تأییدی است بر نقش مهمی که این فرآیند در علم فیزیک سایزهای مختلف (از میکرو تا ماکرو) دارد. همچنین برخی از دانشمندان با مطالعه بر روی فرآیندهای جوشش هسته‌ای و جوشش فیلمی دریافتند که وضعیت شبه تعادل و تشکیل مایع سوپرهیت همانطور که در شکل زیر نیز نشان داده شده است به هنگام تبدیل از وضعیت جوشش هسته‌ای پایدار به وضعیت جوشش فیلمی به وجود می‌آید که به آن نقطه شار گرمای اوج گفته می‌شود و بعد از عبور از این نقطه هر افزایش دما سبب کاهش شار گرما می‌شود.[4] محققین در فرآیندها وپدیده‌های مختلف طبیعی و غیر طبیعی از قبیل فرآیند پختن غذاهای غله‌ای به شیوه روزن‌رانی، فرآیند Trigging یا انفجار، فرآیند سیستم گرمایش حلقوی، درگردبادها یا ترنادوها، هنگام حرکت هواپیماها در مناطق سردسیر، حرکت بخار آب در داخل نازل همگرا و واگرا و غیره توانستند حالت شبه تعادل را مشاهده کنند.

2- حالت پایداری شبه تعادل همراه با سوپرهیت

بطور کلی هر مایع که در دمای بالاتر از نقطه جوش خودش تحت شرایطی بتواند بصورت مایع باقی بماند و به بخار تبدیل نشود به آن مایع سوپرهیت گفته می‌شود [5] همانطور که در دیاگرام P-T (شکل1) برای یک مایع سوپرهیت و شرایط شبه تعادل در زیر رسم شده است، در دیاگرام P-T در ابتدا مایع در وضعیت‌های e و b می‌باشد و نقطه c وضعیت بخار خالص را نشان می‌دهد. اگر مایع بطور آهسته گرم شود و دمایش افزایش یابد و درضمن مایع مورد نظر عاری از هر گونه ناخالصی‌ها بوده و سطوح تماس با مایع هم



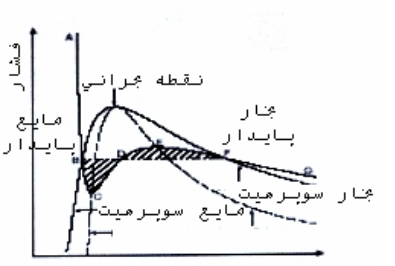
شکل(1): منحنی فشار-دما

صاف باشد مایع می‌تواند در اثر گرم شدن به نقطه c برسد بدون آنکه جوشش اتفاق بیفتد. در نقطه d مایع سوپرهیت بوده و شرایط شبه تعادل حکمفرما می‌باشد اگر در این شرایط اغتشاشاتی در سیستم وارد شود فوراً مایع شروع به جوشش نموده و حباب‌های کروی تولید و مایع به بخار تبدیل می‌گردد و در نتیجه حالت g وسپس e را خواهیم داشت این اغتشاشات می‌تواند بوسیله زبری و یا حتی وارد کردن یک میله فلزی به داخل مایع و غیره ایجاد گردد به این عوامل اغتشاش Nucleic گفته می‌شود وعامل جوشش را هسته مرکزی اغتشاش نامند مایعات تحت شرایط مختلف دارای درجات سوپرهیت متفاوت می‌باشند. [1]

3- درجه سوپرهیت

عبارتست از اختلاف درجه حرارت مایع بین یک درجه حرارت بالا و نقطه جوش مایع در فشار یکسان می‌باشد که در دیاگرام شکل بالا اختلاف f و c همان درجه سوپرهیت می‌باشد.[5] در مورد دیاگرام P-V نیز که در زیر آمده است وضعیت بدین صورت است وقتی مایع منبسط می‌گردد در آن سوی نقطه B و در دمای ثابت فشار افزایش می‌یابد وقتی به نقطه D می‌رسیم حالت شبه تعادل شروع می‌شود و در طول خط BC سیستم در تعادل پایدار نمی‌باشد بلکه در وضعیت تعادل کم ثبات می‌باشد اگر فشار کم باشد مایعی که در آنسوی نقطه C قرار دارد نمی‌تواند سوپرهیت گردد. با توجه به منحنی P-V درمی‌یابیم وقتی آزمایش را در درجه حرارت‌های بالای نقطه جوش انجام دهیم دیگر شرایط تعادل کم‌ثبات بوجود نخواهد آمد بنابراین برای بوجود آمدن شرایط تعادل کم‌ثبات لازم است که دما، از دمای جوش مایع بالا باشد.

تحقیقات نشان داده است که وقتی $\left[\frac{\partial p}{\partial v}\right]_T < 0$ شرایط شبه تعادل در مایع می‌تواند حکم فرما باشد ولی وقتی $\left[\frac{\partial p}{\partial v}\right]_T > 0$ مایع در شرایط ناپایدار می‌باشد.



شکل(2): منحنی فشار-دما مشخص کننده مکان‌های شبه تعادل

شکل(3): نحوه استقرار یک هسته به هنگام تولید نسبت به سطح

4- هسته زایی(Nucleation)

هسته‌زایی فرآیندی است که به تشکیل هسته‌ها که منجر به تشکیل یک فاز جدید می‌شود واسطه می‌باشد و همانطور که قبلاً ذکر گردید انحرافات مختلفی می‌توانند این وضعیت را بوجود آورند بطور کلی دو نوع هسته زایی داریم: همگن(homogenous) و ناهمگن (heterogeneous). هسته زایی همگن بوسیله حرارت متمرکز و نوسانات دانسیته در فاز مایع شبه تعادل می‌باشد چیزی که دسته مولکول‌ها را به طرف بخار شدن هدایت می‌کنند مانند حالت انرژی. این دسته مولکول‌ها مجدداً توسعه می‌یابند تا بحالت بخار بحران یا همان جوشش هسته‌ای برسند. هسته‌زایی ناهمگن وقتی بوجود می‌آید که فاز مایع تماس پیدا کند با فازهای دیگر یا با بدنه خارجی، نظیر سطح حباب‌های گاز پائین فعالیت می‌تواند بوسیله فعالیت کششی سطحی مایع کاهش و یا حتی حذف گردد. رابطه میزان هسته زایی (J) با کشش سطحی σ در هسته‌زایی ناهمگن در یک سطح جامد در زیر آمده است [6]:

$$j = N^{\frac{2}{3}}\left(\frac{1+\cos\theta}{2}\right)\sqrt{\frac{2\sigma_{lv}}{\pi m B f(\theta)}}\exp\left(-\frac{16\pi\sigma_{lv}^{3} f(\theta)}{3kT(\eta T_{sat}(T)-P)^{2}}\right) \quad (1)$$

که درآن:

$$B = 1-\frac{1}{3}\left(1-\frac{P}{\eta P_{sat}(T)}\right)\approx\frac{2}{3},\ \eta = \exp\frac{v(P-P_{sat}(T))}{RT} \quad (2)$$

$$, f(\theta) = \frac{1}{4}(2+3\cos\theta-\cos^{3}\theta)$$

وجود یک سد انرژی برای متوقف کردن ایجاد هسته‌زایی بخاطر سطح مشترک مابین فازهای بخار و مایع می‌باشد. انرژی آزاد مورد نیاز برای تشکیل یک حباب بخار کروی به شعاع r در یک مایع بوسیله Gibbs با استفاده از ترمودینامیک کلاسیک بصورت زیر بدست می‌آید.[5]

$$G = 4\pi r^{2}\gamma(t) - (4\pi 3)r^{3}(p_{v}-p_{o}) \quad (3)$$

که در آن $\gamma(T)$ کشش سطحی (در سطح مشترک مایع و بخار) از مایع، T درجه حرارت و P_V فشار بخار تعادل مایع سوپرهیت می‌باشد و P_0 فشار محیط می‌باشد. اختلاف $P_V - P_0$ اغلب بصورت ΔPo مورد استفاده قرار می‌گیرد که این اختلاف فشار در واقع نشان دهنده درجه سوپرهیت مایع در دمای T نیز می‌باشد بنابراین اگر $P_V = P_0$ باشد دیگر حالت سوپرهیت اتفاق نمی افتد.

در ضمن علاوه برفرمول وندروال، رابطه دیگری نیز در ارتباط با انرژی گیبس بدست آمده است که در زیر آمده است.[6]:

$$\Delta G = \gamma.A + \Delta g.V \quad (4)$$

که در آن ΔG مقدار انرژی آزاد گیبس و γ کشش سطحی و A مساحت و V حجم حباب کروی است و Δg تفاوت انرژی آزاد گیبس مابین بخار و سطح جامد با فرض اینکه بخار یک گاز ایده‌آل است از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta g = -\rho_{i}.k_{b}.T.\ln\left(\frac{\rho}{\rho_{i}}\right) \quad (5)$$

با بررسی دو فرمول بالا به این نتیجه می‌رسیم که وقتی $P_V - P_0$ صفر است یعنی $P_V = P_0$ که همان معادل $\rho_e = \rho$ در رابطه دوم می‌باشد یعنی $\Delta g = 0$ پس $\Delta G = \gamma.A$ می‌شود. همچنین رابطه دیگری که با استفاده از دو رابطه بالا بدست می‌آید بصورت زیر است :

$$P_V - P_0 = \rho_{i}.k_{b}.T.\ln\left(\frac{\rho}{\rho_{i}}\right) \quad (6)$$

یعنی اگر بخواهیم درجه سوپرهیت بیشتر شود باید $P_V >> P_0$ یا $\rho_V >> \rho_0$ باشد .

5- محدودیت سوپرهیت

ممکن است پس از مرور کردن مباحث ذکر شده این سوال پیش آید که ماکزیمم درجه سوپرهیت که در یک مایع می‌تواند بدست آید چقدر است و یا چقدر درجه حرارت یک مایع می‌تواند افزایش یابد بدون اینکه جوشش اتفاق بیفتد. یک محدودیت بالای تئوریکی از سوپرهیت دمای بحرانی مایع است. زمانیکه در درجه حرارت بالای نقطه جوش هستیم فاز مایع نمی‌تواند به مقدار زیادی بوجود آید اگر چه یک دمای ماکزیمم قابل دسترس وجود دارد برای یک مایع قبل از اینکه جوشش اتفاق بیفتد، که محدودیت سوپرهیت (Ts_1) نام دارد. آن جالب است بدانیم که تا چه حد رسیدن به محدودیت بالای ترمودینامیکی امکان‌پذیر خواهد بود. محدودیت سوپرهیت می‌تواند برآورده گردد بوسیله تئوری پایداری ترمودینامیکی یا آنالیزهایی که به واسطه دینامیک سایز بحرانی حباب‌های بخار می‌باشد، این محدودیت با استفاده از معادله وندروال به صورت زیر قابل محاسبه است [5]:

$$T_{s1}=27T_c/32 \quad (7)$$

یک فرمول تجربی با ارزش دیگر که برای بیشتر مایعات Organic نیز در رابطه با بحث مذکور صادق است که در آن Pc فشار بحرانی و P فشار محیط می‌باشد عبارتست :

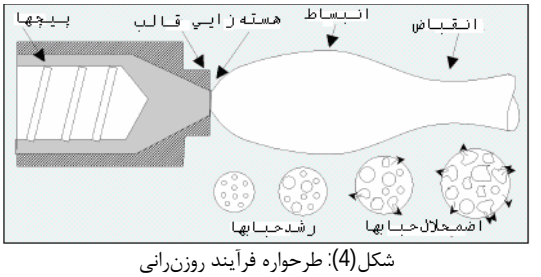
$$T_{s1}=Tc[0.11(P/P_c)+0.89] \quad (8)$$

6- بعضی از فرآیندهایی شامل پایداری کم ثبات همراه با سوپرهیت

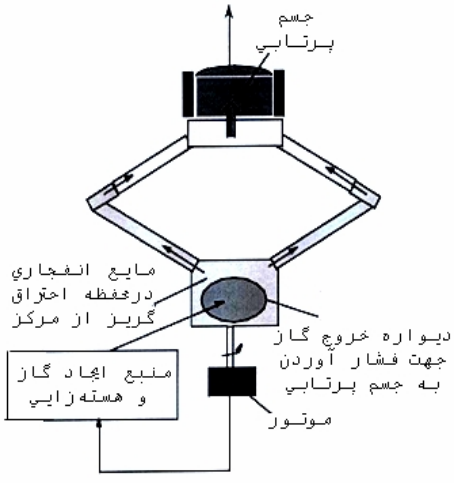
فرآیندهایی زیادی امروزه در صنایع مختلف در جهان وجود دارد که پدیده شبه تعادل در آنها دیده شده است که در زیر نمونه هایی از این موارد ذکر شده است :

الف: روزن‌رانی(Extrude Expansion)

یکی از مواردی که پدیده شبه عادل و هسته زایی در آنها دیده شده است فرآیند پختن یا گرم شدن غذاهای غله‌ای از قبیل انواع نان، نانهای گندمی، جو، چس فیل(Popcorn)، برنج و ... تحت فرآیند روزن رانی که یک پدیده یا فرآیند نسبتاً پیچیده‌ای است که معمولاً در دمای بالا و در رطوبت کم اتفاق می‌افتد می‌باشد که همراه با انبساط و برجستگی در محصولات ایجاد شده است و



شکل(4): طرحواره فرآیند روزن‌رانی



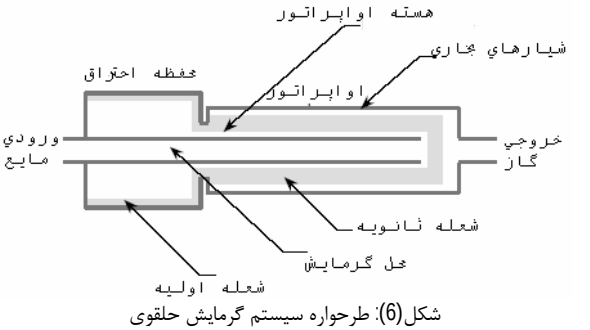
شکل(5): یک وسیله ذخیره سازی انرژی جهت استفاده در فرآیند انفجار

متشکل از چندین فرآیند شامل دگرگونی ساختار بیوپلیمری، تغییر فاز، هسته زایی، انبساط همراه با برجستگی (Extradite Swell)، تولید حبابها که تقریباً بطور متعادلی در بوجود آوردن این پدیده شرکت دارند[7]. Kokini و همکارانش (1992) تقریباً فازهای مختلفی را که در آن روزن رانی را شامل می‌شود شناسائی نمودند که آن پدیده ها بطور خلاصه در شکل (4) در زیر نشان داده شده است:

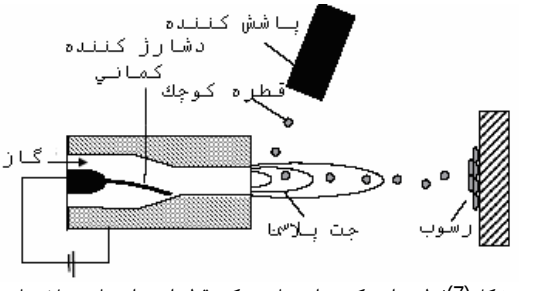
که این مکانیزمها در پاراگراف قبل معرفی شدند و آن بدین صورت انجام می پذیرد که ابتدا نیروی برشی بالا همراه با فشار، درجه حرارت بالای داخل اکسترودر منجر به تغییر شکل آردهای غله ای به حالت ذوب و ویسکو الاستیک (ذوبی که حالت پلاستیک مانند دارد) می‌شود.

ب: فرآیند داخل موتورهای تزریق مستقیم گازوئیلی (GDI)

این موتورها که با یک تکنولوژی جدیدی همراه است فرآیند داخل آن بر مبنای پاشش بنزین و فرآیند تبخیر در کمترین زمان ممکن است[8]. دراین موتورها سوختی که تزریق خواهد شد می‌تواند قبل از تزریق بوسیله انتقال گرما از سرسیلندر و تزریق



شکل(6): طرحواره سیستم گرمایش حلقوی



شکل(7): طرحواره یک ژنراتورهای میکرو قطره‌ای برای تابش پلاسمائی

کننده (injector) گرم شود. بنزین گرم شده به آسانی می‌تواند به فشاربخاری که بالاتر از فشار سیلندر است برسد در هنگامی که فرآیند تزریق سوخت انجام می پذیرد و در این حالت شرایط شبه تعادل حکمفرما است و سوخت به صورت سوپرهیت است، اگر این سوخت سوپرهیت با فشارکمی که درقسمت سیلندر موتور می‌باشد مواجه شود قسمتی از سوخت سریعا" به واسطه جوشش ناگهانی تبخیر می‌شود.

ج: فرآیند انفجار (Trigging)

یکی دیگر از مواردی که شرایط شبه تعادل مشاهده شده است شرایط مربوط به انفجار همراه با فرآیند تبخیر (Trigging) یا pretension با استفاده از مایعات pretensioner نظیر اکتان، اتانل و... می‌باشد[9]. این پدیده یا این نوع انفجار در یک فشار منفی صورت می گیرد مایعات ذکر شده به محض رسیدن به یک وضعیت مناسبی از ناپایداری منجر شده و انرژی ذخیره شده‌شان آزاد می‌شود دانشمندان بر روی این پدیده و همچنین تعیین سرحدهای گسیختگی یا انفجار و مایعات pretension انجام داده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که ماکزیمم اندازه ممکن از pretension قبل از شروع کاویتاسیون برای یک مایع به این منظور بطور مثال برای آب و جیوه می‌تواند بسیار بزرگ به ترتیب در حدود 1400bar و 170bar باشد. در این وضعیت مواد در حالت شرایط شبه تعادل هستند در چنین حالتی که منجر به انفجار می‌گردد که همراه با فشارهای موضعی زیاد و درجه حرارت زیادی می‌باشد می‌تواند انرژی بسیار زیادی آزاد گردد که همراه با قابلیت تراکم بسیار بالا که حتی در حدود 15 برابر بیشتر از TNT می‌تواند باشد.. وضعیت نزدیک به حالت انفجاری همگن هنگامی است که بطور استاتیکی و ذاتاً دارای نوسانات بسیار شدیدی باشیم. وسایل ذخیره‌سازی انرژی در سیال با استفاده از چنین پدیده‌ای که همراه با شرایط تعادلی است می‌تواند با استفاده از سانتریفوژهای گریز از مرکز که نمونه‌ای از آن در شکل 5 در زیر نشان داده شده است باشد.

د: فرآیند سیستم گرمایش حلقوی(LHP)

یکی دیگر از مواردی که می‌توان وضعیت پایداری کم‌ثبات همراه با مایع سوپرهیت را مشاهده نمود در سیستم گرمایش حلقوی می‌باشد[10]. این سیستم همانطور که در شکل 6 در زیر نشان داده شده است دارای یک اواپراتور می‌باشد که این اواپراتور دارای محفظه احتراق، هسته و شیارهای بخاری لوله پهن در وسط آن و یک سری فیتیله‌هایی می‌باشد که در سرتاسر دیواره داخل و محفظه احتراق وجود دارد و مزیت این سیستم بخاطر نیاز داشتن به انرژی ورودی کم برای شروع به کار است و عامل کار کردن سیستم LHP وجود اختلاف فشار در سرتاسر فیتله و در نتیجه وجود گرادیان دما در اطراف آن می‌باشد .اساس کار آن بطور خلاصه به این صورت می‌باشد که گرما از طریق محفظه احتراق اعمال می‌شود به دیوارهای اواپراتور و بنابراین آن اجازه می‌دهد سیستم شروع به پمپ کردن کند و سپس در ادامه گرمایش، ایجاد بخار می‌شود که بخار از شیارهای بخاری خارج و در نتیجه مایع موجود در داخل لوله را گرم کند.

ه: فرآیند داخل بعضی از ژنراتورهای میکرو قطره‌ای (Micro droplet)

یکی دیگر از مواردی که پدیده شبه تعادل مشاهده شده است نوعی از ژنراتورهای میکرو قطره‌ای است که برای تابش پلاسمایی بکار می‌رود[11]. این ژنراتورها در حقیقت سایز کوچکی از ژنراتورهای قطره‌ای می‌باشد که موارد استفاده زیادی امروزه دارند که برخی استفاده‌های مهم این دستگاه‌ها از قبیل پرینترهای جوهرافشان، دستگاه‌های رنگ افشان، دستگاه‌های direct-writing،دستگاه‌های تزریق سوخت، صنایع بسته‌بندی، دستگاه‌های تابش پلاسمایی و غیره می‌باشد. اما در ارتباط با بحث پایداری کم‌ثبات ژنراتورهای میکرو قطره‌ای می‌باشد که برای تابش پلاسمائی با استفاده از ذرات بسیار ریز سرامیک صورت می‌گیرد که طرحواره آن در شکل (7) در زیر نشان داده شده است که در هنگام پاشش

ذرات سرامیک تحت یک فرایند رو به بالا صورت می‌گیرد پدیده شبه‌تعادل و همچنین تراکم شدیدی از نقص‌های نقطه‌ای در آن بعضاً دیده شده است.

7- بعضی از کاربردهای مایعات سوپرهیت

مایعات سوپرهیت امروزه استفاده‌های گوناگونی در علوم مختلف دارد که در زیر نمونه‌های از این موارد آمده است:

الف: تابش ذرات نوترون

استفاده از مایعات سوپرهیت به منظور تابش ذرات نوترون اولین بار توسط دانشمندی به نام Glaser صورت گرفت[12]، اساس کار وی استفاده از یک محفظه‌ای که اتاقک حباب بعداً نامگذاری شده بود وی با عبور دادن ذرات انرژی از داخل این محفظه و با کاهش فشار داخل محفظه و با استفاده از مایعاتی نظیر R-12 ($C_2CL_2F_4$) و با گرم کردن محفظه و در نتیجه تبخیر مایع مذکور و ایجاد حباب‌ها توانست به این موفقیت نائل آید در ضمن لازم بذکر است که هنگامی که مایع در حالت تبدیل به بخار می‌باشد نیاز است که فشار محفظه ثابت نگه داشته شود.

ب: تابش ذرات گاما ویون‌های سنگین

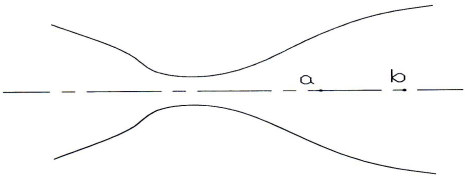
محققین در ادامه راه دانشمندانی که موفق به تابش ذرات نوترون با استفاده ازمایعات سوپرهیت شدند با استفاده از روش‌های مشابه و مایعات سوپرهیت توانستند اشعات گاما را نیز بتابانند[12]. بدین منظور با استفاده از مایع R-114 ($C_2CL_2F_4$) با درجه حرارت اولیه 50 درجه سانتیگراد دما و ادامه گرمایش تا70 درجه سانتیگراد و تبدیل مایع به بخار و فرآیند هسته‌زایی این کار میسر شد.

ج: استفاده از مایعات سوپرهیت در داخل میکروتیوب ها

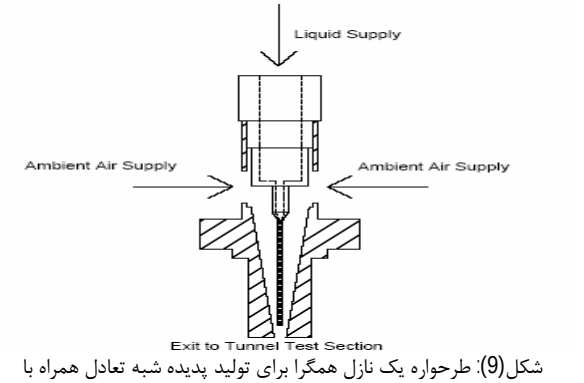
یکی دیگر ازموارد استفاده مایعات سوپرهیت در داخل میکروتیوب ها در دستگاههای مختلف از جمله مبادله کنهای فشرده گرما از نوع بدون استفاده از سطوح انبساط یافته می‌باشد[13]. این میکروتیوب ها که قطر آنها عموماً از سایز 0,6 تا 3 میلیمتر می‌باشد در این پروسه ضریب انتقال حرارت با افزایش کیفیت بخار و سوپرهیت شدن نزدیک دیواره کاهش می یابد .

8- حالت پایداری کم ثبات همراه با سوپرکولد

آزمایشات نشان داده است که اگر آب را در داخل یک ظرف صیقلی بزرگ خنک کنیم آب به صفر درجه سانتیگراد می‌رسد ولی هنوز در داخل یخ تشکیل شده آب وجود دارد اگر به این ظرف با



شکل(8): طرحواره یک نازل همگرا و واگرا



شکل(9): طرحواره یک نازل همگرا برای تولید پدیده شبه تعادل همراه با بخارفراسرد و کاربردهای آن

انگشتان ضربه بسیار کوچکی بزنیم (این ضربه حکم هسته‌زایی را دارد) آب سریعاً یخ بسته و بلورهای یخ در سرتاسر محیط مورد نظر تشکیل می‌شود به این حالت درترمودینامیک مایع سوپرکولد گفته می‌شود.

9- بعضی از فرآیندهایی شامل حالت پایداری کم ثبات همراه با سوپرکولد

فرآیندهایی امروزه در در جهان وجود دارد که پدیده شبه تعادل همراه با مایع سوپرکولد در آنها دیده شده است که در زیر نمونه هایی از این موارد ذکر شده است :

الف: حرکت هواپیماها در مناطق سردسیر[14]:

از مواردی که پدیده شبه تعادل همراه با مایع سوپرکولد دیده شده است هنگامی است که هواپیما و یا هر نوع وسیله پرنده دیگری در حال پرواز در قسمت نسبتاً سردسیری و از میان ابرها می‌باشد و دمای محیط بین0 تا C°10- است.در این هنگام قطرات آب بخصوص در برخورد با بالهای هوا به سرعت یخ زده و قطراتی نیز در این حالت تشکیل می‌شود که به آنها قطرات سوپرکولد گفته می‌شود و سایز این قطرات از رنج 30 تا 400mm می‌تواند باشد که کوچکتر از سایر قطرات باران بوده و بزرگتر از سایز قطرات ابری می‌باشد. مطالعات نشان داده است که یخ بستن قطرات باران و یا ابری در هوا

نتیجه تغییرات که به واسطه افت انرژی است یا وقتی که هواپیما در شرایط جوی مذکور از باند بلند می‌شود. به دلیل اینکه تغییرات درجه حرارت اتمسفر وابسته به پارامتر ارتفاع می‌باشد. این شرایط یخ بستن فقط در یک لایه نسبتا نازکی بوجود می‌آید.

ب: حرکت کشتی ها و زیردریایها در آب‌های سرد و نزدیک قطبها:

حالت مشابه با حالت قبلی که می‌تواند اتفاق بیفتد به واسطه حرکت زیردریایی‌ها یا کشتی‌ها در آب‌های سرد و قطب‌ها می‌تواند اتفاق بیفتد که در این حالت به هنگام عبورکشتی‌ها به خصوص از میان یخ‌ها می‌تواند منجر به تشکیل پدیده شبه تعادل گردد[14].

ج: گردبادها و ترنادوها:

یکی دیگر از حالت‌هایی که محققین نشانه‌ای از پدیده شبه تعادل را در آن مشاهده کرده‌اند در گردبادها یا ترنادوها می‌باشد بطوریکه یکی از محققین گردبادها را به بندرگاه مایعات سوپرکولد تشبیه کرده است[14].

10- کاربردهای مایعات سوپرکولد

مایعات سوپرکولد و یا همان Cryogen ها نیز همچون مایعات سوپرهیت امروزه استفاده‌های گوناگونی در علوم مختلف دارد که در زیر نمونه هایی از این موارد آمده است :

الف: سرد کردن تجهیزات آزمایشگاهی

یکی از کاربردهای مایعات سوپرکولد یا همان Cryogenها استفاده از آنها برای سرد کردن در بعضی از تجهیزات در آزمایشگاه می‌باشد مدل‌های شتاب دهنده مافوق هادی و مغناطیس‌های experimental-area کاربرد نخواهند داشت مگر اینکه توسط مایعات سوپرکولد همچون مایع هلیم تا درجه حرارت‌های برودتی سرد گردند[14].

ب: سرد کردن دستگاههای عکسبرداری Nicomos

یکی دیگر از این موارد کاربرد مایعات سوپرکولد در دستگاه‌ها و سیستم‌های سردکننده‌ای است که برای سرد کردن دستگاه‌های عکسبرداری Near-Infrared Camera and Multi-object spectrometer و یا همان NICMOS ها بکار می‌رود[15]. NICMOS دستگاهی است که شامل سه دوربین فیلمبرداری می‌باشد که از موضوعات بسیار عریض می‌توانند عکسبرداری کنند. همچنین از مسافت‌های طولانی نظیر ابرها و حتی ستارگان و سیارات به عنوان یک اسپکترومتر، تاج نگار و یا قطب سنج از NICMOS استفاده می‌شود.

11- حالت پایداری کم ثبات و بخـار فراسـرد Subcold (vapor)

فرض کنید یک نازل همگرا و واگرا داریم اگر بخار آب در داخل این نازل حرکت کند آنچه انتظار می‌رود اینست که در قسمت واگرا و مثلاً در در مقطع a (شکل 8) چگالش رخ دهد. اما آزمایشات نشان داده است که در مقطع a چگالش رخ نداده بلکه این چگالش در نزدیک مقطع b رخ می‌دهد [2].

در مقطع b وقتی اولین قطره چگالش می‌یابد سریعاً تمام مقطع شروع به چگالش می‌کند که به این حالت شوک چگالش یا Condition Shock گویند بنابراین در این حالت وجود اولین قطره چگالش یافته حکم Nuclei را خواهد داشت که موجب می‌گردد تمام مقطع سریعاً چگالش کند. البته همانطور که قبلاً ذکر شد اغتشاشات می‌تواند باعث از بین رفتن وضعیت هسته زایی و یا زودتر بوجود آمدن آن گردد که در این مورد هم اغتشاشاتی از قبیل زبری مابین قسمتهای a و b و همچنین تزریق قطره از طریق دیواره سیال به بخار موجود در قسمت a و b می‌تواند سبب رخ دادن سریعتر چگالش گردد که اغتشاشات ذکر شده حکم nuclei را دارند این حالت بخارفراسرد نیز نامیده می‌شود.

12- فرآینـد شـامل پدیـده شـبه تعـادل همـراه بـا بخارفراسرد و کاربردهای آن

یکی از مواردی که در آن پدیده شبه تعادل مشابه با وضعیتی که در قسمت 3 بیان شد مشاهده شد متدی بود که در آن از نازل های همگرا و واگرا یا نازل های همگرا برای ایجاد و برش قطرات مایع استفاده شد. در این متد با استفاده از یک نازل همگرا 6 درجه، با مساحت گلوگاه در حدود 4,45 مترمربع و با یک سوزن در خروجی نازل با قطر 0,04mm(0,0156 in) و بود و قسمت داخلی نازل از ماده پلاستیکی بوده و درانتها یک پی‌پت 50 ml و قسمت خارجی نازل از اپوکسی رزین شده ساخته شده است که در شکل(9) بصورت شماتیک نشان داده شده است. در این فرآیند مایع الکل از درون نازل جریان می یابد و سپس با عبور از سوزن به طرف تونل تست هدایت می‌شود و جریان هوا با سرعت نزدیک به سرعت صوت درقسمت بالای تونل تست عمود بر جریان مایع می دمد که این جریان هوا هم قطرات مایع تولیدی را برش داده و هم آنها را به داخل تونل تست هدایت کند

وجود سرعت‌های ناچیز در نوک سوزن سبب تولید قطراتی به قطر 0.1mm می‌گردد که تعداد قطرات تولیدی می‌تواند در عدد ماخ 0,85 در نقطه‌ای که آنها وارد قسمت تونل تست می‌شود. زمانیکه قطره از قسمت خروجی نازل عبور نموده و سپس از داخل سوزن وارد تونل می‌شود در اثر جریان پائین دست پس از شوک در داخل شیپوره، نقطه جوش موضعی پائین می‌آید که متعاقب آن فشار موضعی کاهش می‌یابد. بنابراین پائین آمدن نقطه جوش موضعی مهم‌ترین عامل سوپرهیت شدن و پدید آمدن شرایط شبه‌تعادل در این متد می‌باشد و موارد استفاده هایی که از این متد پیش‌بینی شده است استفاده از آن برای تنظیم فشار هوای داخل سفینه‌ها و هواپیماها می‌باشد.

13- نتیجه گیری

با توجه به مطالعات و تحقیقاتی که تاکنون در مورد پدیده شبه تعادل و موارد ناشی از آن صورت گرفته است می‌توان نتایجی که ذیلاً می‌آید را برداشت نمود:

1- فرآیندهایی که درآن پدیده شبه تعادل منجر به وضعیت شرایط سوپرهیت یا سوپرکولد شده، چه در طبیعت وچه در صنایع مختلف دیده شده است یا می‌تواند اتفاق بیفتد بسیار زیادتر از حالتی از این پدیده است که منجر به وضعیت بخار فراسرد شده است که تاکنون این وضعیت فقط در هنگام عبور بخار از نازل‌های همگرا یا همگرا و واگرا دیده شده است.

2- برای اینکه شرایط سوپرهیت در یک مایع بوجود نیاید باید $P_V = P_0$ یعنی فشاربخار مایع با فشار در خروج برابر باشد یا $\rho_e = \rho$ یعنی چگالی مایع برابر با چگالی خروجی برابر باشد.

3- در بعضی موارد و صنایع لازم است که شرایطی تعبیه گردد تا از بوجود آمدن شرایط سوپرهیت یا سوپرکولد عمدتاً به خاطر صرفه‌جوئی در زمان جلوگیری شود و در بعضی موارد هم بخاطر موارد کاربردی این موارد لازم است شرایطی تعبیه گردد که این حالت تداوم داشته باشد .

14- منابع و مأخذ (References)

[1] W.C.Reynoldes and H.C. Perkins, "Engineering thermodynamics",. 2nded McGraw- Hill Book Co , New York ,1977

[2] E.Sonntag and G.J. Van Vailen, "Introduction to thermodynamics", Classical and Statistical , 2nded, New York ,1982

[3] O.A. Hougen, K.M. Watson ,and Ragatz, "Chemical Process Principles, thermodynamics" , 2nded , New York ,1959

[4] M. Najate Ozishik -"Heat Transfer" 2nd. Ed.,1990

[5] (Training center/center deformation)- "Introduction to Thermodynamic"

[6] " Pictures and diagrams about Nucleation dynamics and Superheat state".

[7] C.I.Moraru and J.L.Cocini., "Nucleation and expansion During Extrusion and Microwave heating of Cereal Foods"

[8] Baifang Zuo,A.M.gomes and C.J.Rutland., "Studies of Superheated Fuel Spray Structures and Vaporization in GDI engines"

[9] Rusi P. Taleyarkhan, Colin D.west and Jaeseaon Cho -" Nano-to-Macro Scale Trigging of Meta stable Fluids"

[10] Jane Baumann & Brent Cullimore "A Methodology for Enveloping Reliable State –up of LHPS"

[11] Fan-Gang Tseng National Tsing Hna University. "Microdroplet Generators"

[12] S.C.Roy "Use of Superheated Liquid in neutron detection"

[13] Tzu-Hasing Yen, Nubuhido Kasagi "Forced Convective Boiling Heat transfer in Micro tubes at low Mass and heat Fluxes"

[14] Byron M.Keel , Charles E.Stancil, EcKert,Susan M.Brown "Aviation Weather Information Requirements"

[15] T.Simon "Use cryogens for cooling Lab equipment"s