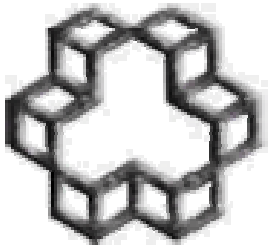


دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه برای دریافت کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی

مدلسازی عددی سیستم کرایوکولرلوله پالسی

اساتید راهنما

دکتر علی اشرفی زاده دکتر عبداله شادآرام

نگارش :

مهسا بلوک نخجیری

بهمن ۱۳۹۰

چکیده :

در فصل اول ساختار سیستم کرایوکولر لوله‌پالسی تشریح شده است. یخچالهای لوله پالسی جزو خانواده بزرگی از یخچالهای کرایوژنیکی هستند که قابلیت های بالقوه ای در رسیدن به دماهای پایین دارند. یخچال لوله پالسی به واسطه فقدان عضو متحرک در ساختمانش باعث شده است که دارای ساختمانی ساده، هزینه ای به مراتب پایین تر و طول عمر بالا باشد. در فصل دوم مروری بر کارهای انجام شده تجربی و عددی در ارتباط با سیستم کرایوکولر لوله‌پالسی صورت گرفته است. در فصل سوم نحوه گسسته سازی معادلات حاکم بر سیستم توضیح داده شده است. در این فصل با توجه به این که مولد نوسان فشار سیستم، کمپرسور است، مش اول را متحرک و سایر مش‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. فشار از ترکیب معادله حالت و پیوستگی بدست آمده و در معادله ممنتوم قرار داده شده است. از حل همزمان سه ماتریس حاصل از گسسته سازی معادله ممنتوم، معادله انرژی گاز و معادله انرژی جامد(که فقط برای جامد بازیاب حل می شود) ، دبی جرمی، فشار ، دمای گاز و دمای جامد بازیاب بدست آمدند. در فصل چهارم علاوه بر مش اول که کمپرسور است ، سایر حجم های کنترل نیز با سرعتی که تابعی از حرکت کمپرسور است حرکت داده شده اند و پس از گسسته سازی معادلات و حل ماتریس‌ها مجهولات بدست آمدند. در فصل پنجم نتایج حاصل از دو روش ارائه و با مرجع مقایسه شده‌اند.

کلمات کلیدی: لوله پالسی، بازیاب، شبکه ثابت، شبکه متحرک، معادلات حاکم، دبی جرمی و دما

فهرست مطالب

فصل اول : مروری بر سیستم کرایوکولر لوله پالسی.....۱

۱-۱ مقدمه.....۲

۱-۲ کرایوژنیک چیست ؟.....۲

۱-۳ یخچالهای کرایوژنیکی.....۳

۱-۴ یخچال لوله پالسی کرایوژنیکی.....۴

۱-۵ ساختمان یخچال لوله پالسی.....۵

۱-۶ مکانیزم تولید برودت در یخچالهای لوله پالسی.....۶

۱-۷ انواع پیکر بندیهای مهم یخچال لوله پالسی.....۸

۱-۸ یخچال لوله پالسی اولیه.....۱۰

۱-۹ یخچال لوله پالسی اریفیسی.....۱۰

۱-۱۰ یخچال لوله پالسی دو ورودە.....۱۲

۱-۱۱ یخچال لوله پالسی اکتیو بافر (ABPTR).....۱۳

۱-۱۲ یخچال لوله پالسی استرلینگی وGM ۱۴

۱-۱۳ یخچال لوله پالسی چهار شیره (FVPTR).....۱۶

۱-۱۴ یخچال لوله پالسی پنج شیره ۱۶

۱-۱۵ یخچال لوله پالسی با لوله اینرتنس ۱۷

فصل دوم : مروری بر کارهای قبلی سیستم کرایوکولر لوله پالسی.....۱۹

۲-۱ مقدمه.....۲۰

۲-۲ کارهای تجربی.....۲۰

۲-۳ کارهای عددی.....۲۱

فصل سوم : گسسته سازی معادلات حاکم بر سیستم کرایوکولر لوله پالسی به روش حجم کنترل ثابت.....۳۵

۳-۱ مقدمه.....۳۶

۳-۲ میدان حل مسئله.....۳۶

۳-۳- معادلات حاکم.....۳۹

۳-۴-معادله پیوستگی.....۴۰

۳-۵-معادله ممنتوم.....۴۱

۳-۶-شرط مرزی معادله ممنتوم.....۴۳

۳-۷-محاسبه دبی جرمی.....۴۳

۳-۸-محاسبه فشار.....۴۴

۳-۹-محاسبه فشار و دما روی سطوح.....۴۵

۳-۱۰-معادله انرژی گاز.....۴۵

۳-۱۱-شرط مرزی معادله انرژی.....۴۶

۳-۱۲-محاسبه دما ۴۷

۳-۱۳-معادله انرژی برای بازیاب.....۴۸

۳-۱۴-خواص ترموفیزیکی.....۴۹

۳-۱۴-۱خواص ترموفیزیکی گاز.....۴۹

۳-۱۴-۲ -خواص ترموفیزیکی جامد بازیاب.....۴۹

۳-۱۵-پارامترهای هندسی.....۵۰

۳-۱۶-ضریب انتقال حرارت.....۵۱

فصل چهارم :گسسته سازی معادلات حاکم بر سیستم کرایوکولر لوله پالسی به روش حجم کنترل متحرک.....۵۳

۴-۱-مقدمه.....۵۴

۴-۲-حرکت حجم کنترل.....۵۴

۴-۳-معادله پیوستگی.....۵۶

۴-۴-معادله ممنتوم.....۵۷

۴-۵-محاسبه دبی جرمی.....۶۰

۴-۶-محاسبه فشار.....۶۱

۴-۷-محاسبه فشار و دما روی سطوح.... .....۶۱

۴-۸-محاسبه سرعت روی سطوح ۶۱

۴-۹-معادله انرژی گاز..... ۶۲

۴-۱۰-شرط مرزی معادله انرژی..... ۶۳

۴-۱۱-محاسبه دما..... ۶۳

۴-۱۲- معادله انرژی برای بازیاب..... ۶۴

۴-۱۳-خواص ترموفیزیکی..... ۶۴

۴-۱۴-پارامترهای هندسی..... ۶۴

۴-۱۵-ضریب انتقال حرارت..... ۶۵

فصل پنجم : نتایج مدلسازی عددی در هر دو روش حجم کنترل ثابت و متحرک۷۷

۵-۱-مقدمه..... ۶۶

۵-۲- شرایط اولیه و الگوریتم حل..... ۶۷

۵-۲-۱- الگوریتم حل در مسئله حجم کنترل ثابت..... ۶۷

۵-۲-۲- الگوریتم حل در مسئله حجم کنترل متحرک..... ۶۹

۵-۳-اعتبار سنجی..... ۷۱

۵-۴-استقلال از شبکه..... ۷۳

۵-۴-نتایج در مسئله حجم کنترل ثابت..... ۷۳

۵-۵-نتایج در مسئله حجم کنترل متحرک ۸۲

نتیجه گیری و پیشنهادات..... ۸۸

فهرست شکل‌ها

شکل۱-۱ دیاگرام شماتیک یک یخچال لوله‌پالسی اولیه، به همراه اجزای تشکیل دهنده آن.....۵

شکل۱-۲ دیاگرام شماتیک لوله‌پالسی و مکانیزم سرمایش آن.....۶

شکل۱-۳ دیاگرام شماتیک یک یخچال لوله‌پالسی اریفیسی ۱۱

شکل۱-۴ دیاگرام یخچال لوله‌پالسی دو وروده ۱۳

شکل۱-۵ دیاگرام یخچال لوله‌پالسی اکتیو بافر ۱۳

شکل۱-۶ یخچال لوله‌پالسی الف)نوع استرلینگی ب)نوع GM.....۱۵

شکل۱-۷ دیاگرام شماتیک یک کرایوکولر لوله‌پالسی چهار شیره.....۱۶

شکل۱-۸ دیاگرام شماتیک یک یخچال لوله‌پالسی پنج شیره ۱۷

شکل۱-۹ طرحی از یخچال لوله‌پالسی لوله اینرتنسی ۱۷

شکل۲-۱ تقسیم گره‌ها در ترکیب مدل یک‌بعدی ودو بعدی ۲۸

شکل۲-۲ میدان محاسباتی و اجزا در مدل یک‌بعدی ودو بعدی.....۲۸

شکل ۲-۳ شماتیک کرایو کولر لوله‌پالسی ساخته شده.....۳۴

شکل۳-۱ میدان حل ITPTC نوع استرلینگی ۳۶

شکل ۳-۲ میدان حل گسسته شده.....۳۸

شکل۳-۳ وضعیت مش ها در لوله در روش حجم کنترل ثابت.....۳۹

شکل۴-۱ وضعیت مش ها در لوله در روش حجم کنترل متحرک.....۵۶

شکل۵-۱ : دمای اولیه گاز و جامد.....۶۸

شکل۵-۲ : روند الگوریتم حل ۷۰

شکل ۵-۳ : مقایسه فشار برحسب زمان دربازیاب.....۷۱

شکل۵-۴ : مقایسه فشار برحسب زمان درلوله پالسی.....۷۲

شکل۵-۵ : مقایسه دبی جرمی برحسب مکان درلوله پالسی.....۷۲

شکل ۵-۶ : دبی جرمی برحسب زمان در قسمتهای مختلف.....۷۴

شکل ۵-۷ : ۱.ماکزیمم و ۲.مینیمم دبی جرمی برحسب مکان درون سیستم.....۷۵

شکل ۵-۸ : فشار برحسب زمان در قسمتهای مختلف.....۷۶

شکل ۵-۹ : ۱.ماکزیمم و ۲.مینیمم فشار برحسب مکان درون سیستم.....۷۷

شکل ۵-۱۰ : ۱.ماکزیمم و ۲.مینیمم سرعت برحسب مکان درون سیستم.....۷۸

شکل ۵-۱۱ : ۱.ماکزیمم و ۲.مینیمم دما برحسب مکان درون سیستم.....۷۹

شکل ۵-۱۲ : ۱.دمای گاز و ۲.دمای جامد در میانه بازیاب برحسب زمان.....۸۰

شکل ۵-۱۳ : دمای گاز در نقاط مختلف سیستم برحسب زمان..... ۸۱

شکل ۵-۱۴ : دبی جرمی برحسب زمان در قسمتهای مختلف.....۸۲

شکل ۵-۱۵ : ۱.ماکزیمم و ۲.مینیمم دبی جرمی برحسب مکان درون سیستم.....۸۳

شکل ۵-۱۶ : فشار برحسب زمان در قسمتهای مختلف.....۸۴

شکل ۵-۱۷ : ۱.ماکزیمم و ۲.مینیمم فشار برحسب مکان درون سیستم.....۸۵

شکل ۵-۱۸ : ۱.ماکزیمم و ۲.مینیمم سرعت برحسب مکان درون سیستم.....۸۶

شکل ۵-۱۹ : ۱.دمای گاز و ۲.دمای جامد در میانه بازیاب برحسب زمان.....۸۷

فهرست جداول

جدول ۲-۱ ابعاد هندسی سه نوع از PTR ها.....۲۶

جدول ۳-۱ ابعاد سیستم ITPTC نوع استرلینگی.....۳۷

جدول ۵-۱ مقایسه دبی جرمی و دما در سه سیستم مختلف.....۷۳

پیوست الف ۸۹

پیوست ب ۹۴

فهرست مراجع ۱۰۱

فهرست علائم :

شتاب حرکت مش	aa
مساحت سطح مقطع عبور جریان	A
مساحت سطح انتقال حرارت جابجایی	AL
حرارت مخصوص فشار ثابت گاز	C_P
ظرفیت گرمای ویژه جامد	C_S
قطر هیدرولیکی	dh
گام زمانی	dt
قطر سیم‌های محیط متخلخل	dw
فرکانس	f
ضریب هدایت حرارت گاز	k
ضریب هدایت حرارت جامد	ks
طول	L
دبی جرمی	$\dot{m}$
عدد نوسلت	Nu
عدد پرانتل	Pr
عدد پکلت	Pe
فشار	P

شعاع	r
عدد رینولدز	Re
زمان	t
دما	T
سرعت گاز	u
سرعت مش	uu
حجم	V
حجم مرده کمپرسور	V_d
حجم جابجایی کمپرسور	Vs
مکان	x
نسبت قطر سیم بازیاب به طول گام	z
نسبت قطر سیم بازیاب به طول گام	z
بازه زمانی	δt
فاصله بین دو نود	δx
فاصله بین دو سطح	Δx
تخلخل	ε
لزجت	μ
چگالی	ρ

فصل اول :

مروری بر سیستم کرایوکولر لوله پالسی

۱-۱ مقدمه

تولید برودت از دیرباز مورد توجه بشر بوده است. این نیاز بیشتر در نگهداری مواد غذایی فاسدشدنی تجلی داشته است، ولی کم کم با پیشرفت علوم و فن آوری در عرصه های مختلف صنعت ، نیاز به دماهای کمتر از تبرید خانگی بیشتر نمایان شد. این روند ادامه پیدا کرد، تا آنجا که دانشی جدید به نام کرایوژنیک[۱] پای به عرصه تحقیق و صنعت نهاد. دانش کرایوژنیک زاییده پیشرفت های اخیردر زمینه های مختلف علوم و فن آوری بوده است، واز این لحاظ نسبت به علوم دیگر ترمودینامیک، جوان تر است .

تاریخ جدی علم کرایوژنیک از حدود سال ۱۷۴۰ آغاز می شود. در این سال لومونوسوف [۲]در روسیه توانست با استفاه از مخلوط آب و نمک معمولی به دمایی در حد ۲۵۲ کلوین دست یافته و اثر برودتی آن را تشریح و تفسیر نماید. روند دستیابی به دماهای پایین‌تر همچنان ادامه یافت . به طوری که دانشمندان این علم توانستند، در طی حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ سال به دماهایی نزدیک به صفر کلوین دست یابند.

۱-۲ کرایوژنیک چیست ؟

اصولا" کروس [۳]در زبان یونانی به معنی برفک یا شبنم یخ زده و ژنوس [۴] به معنی سر چشمه یا تولید می باشد. ولی امروزه کرایوژنیک به فن آوری تبرید به طور اعم اطلاق نمی گردد، بلکه فقط مفاهیم و فن آوریهای مرتبط با دستیابی و بکارگیری دماهای کمتر از ۱۲۰ کلوین را شامل می شود. بنابراین علم کرایوژنیک (فن آوری کرایوژنیک) در ارتباط با تولید و بکارگیری حداقل دماهایی است که درروی زمین و در فضای نزدیک زمین در شرایط طبیعی نمی تواند بوجود بیاید. می توان گفت که ارزش علمی و صنعتی فوق العاده حیاتی کرایوژنیک به همراه رشد علاقمندی به دستیابی به دماهای پایین و زمینه های کاربردی وسیع آن، معلول عواملی هست که در زیر به آنها به طور خلاصه اشاره می شود.

---

[۱] Cryogenics
[۲] Lomosonov
[۳] Kruos
[۴] Genus

اولا"، مصرف وکاربرد گازهای مختلف صنعتی مانند اکسیژن، نیتروژن، متان (گاز طبیعی)، آرگون، هیدروژن، هلیم، نئون، کریپتون و دیگر گازها در بسیاری از زمینه های صنعتی مانند متالوژی، شیمی، مهندسی برق، مهندسی انرژی هسته ای، هواپیمایی، فن آوریهای مربوط به راکت و هوافضا، کشاورزی، داروسازی، فرآیند تغذیه وغیره به طرز چشمگیری در حال رشد است. این سیالات هم بصورت مایع وهم بصورت گاز مورد استفاده قرار می گیرند و در محدوده دماهای کرایوژنیکی دارای نقطه جوش پایینی هستند. بنابراین تولید، جابه جا کردن، حمل و نقل، ذخیره آنها کاملا" به علم کرایوژنیک وابسته بوده و در حقیقت قسمت اعظم این علم را تشکیل می دهد. ثانیا"، در دماهای پایین مقاومت الکتریکی کاهش می یابد. ثالثا"، کم کردن دما منجر به کاهش انتروپی ودر نتیجه کاهش اختلالات داخلی می شود. لذا استفاده عملی از این پدیده به منظور کنترل از راه دور ارتباطات رادیویی، فن آوریهای لیزر و مادون قرمز، می تواند این علوم را شدیدا" متحول سازد.

شایان ذکر است که سرمایش عمیق، تقطیر کرایوژنیکی و جذب کرایوژنیکی ابزارهای قدرتمندی را برای خالص سازی و تولید خلا های خیلی بالا فراهم کرده است. بعلاوه آزمایشات بیولوژیکی و پزشکی اخیر روشن کرده است که وقتی ارگانیسم های زنده در دماهای پایین قرار می گیرند، خواصی از خود نشان می دهند که تا به حال شناخته نشده بودند و لذا زمینه کنکاش و تحقیقات جدیدی را در بیولوژی، پزشکی و کشاورزی ایجاد کرده است. سرانجام اینکه وسایل و دستگاههای کرایوژنیکی نقش برجسته ای در آزمایشات فیزیکی پیچیده و دقیق، ایفا می کنند. بنابراین جای شگفتی نیست که علم کرایوژنیک در این مدت نسبتا" کوتاه، به پیشرفتهای قابل توجهی دست یافته و خود به عنوان یک شاخه مستقل از علم ترمودینامیک، زمینه تحقیقات و پژوهشهای محققین شده است.

۱-۳ یخچالهای کرایوژنیکی

یخچالهای کرایوژنیکی [۵] وسایلی هستند که از آنها برای تولید دماهای کرایوژنیکی استفاده می شود. مهمترین یخچالهای کرایوژنیکی که کاربرد وسیعی در صنعت دارند، عبارتند از یخچال چرخه استرلینگ، یخچال چرخه گیفورد _مک ماهان[۶] و یخچال ژول - تامسون.

[۵] Cryocoolers
[۶] Gifford-McMahan

در هر سه این یخچالها در ناحیه دما پایین، دستگاه دست کم یک عضو متحرک وجود دارد. وجود یک عضو متحرک در ناحیه دما پایین، باعث شده که استفاده از آنها در بسیاری از کاربردها با مشکلاتی مواجه شود. به عنوان مثال وجود عضو متحرک دما پایین، باعث ارتعاش و احیانا" سر وصدا در ناحیه دما پایین، پایین آمدن عمر وسیله، نیاز مداوم به عملیات تعمیر و نگهداری، هزینه اولیه بالا و ساخت نسبتا" مشکلتر وسیله می گردد.

تولید دماهای کرایوژنیکی در بسیاری از کاربردها مستلزم عدم وجود ارتعاش در ناحیه دما پایین است که به خودی خود استفاده از یخچالهای فوق الذکر را با مشکل مواجه می کند.

۱-۴ یخچال لوله پالسی کرایوژنیکی

یخچال لوله پالسی یک اختراع جدید به حساب می آید. اختراع این وسیله برای اولین بار توسط پروفسور گیفورد[۷] و دانشجوی فارغ التحصیلش لانگس ورث [۸]، از دانشگاه سیراکوز[۹] در سال ۱۹۶۳ گزارش شد. پروفسور گیفورد متوجه شد که انتهای بسته لوله کشی مسدودی که به کمپرسورهای گاز متصل است، گرم می شود. وی مشاهده کرد که از اتصال چنین لوله ای از طریق یک بازیاب به یک کمپرسور، دریک سمت لوله سرمایش و در سمت دیگر لوله گرمایش ایجاد می گردد. این همان لوله پالسی اولیه بود.

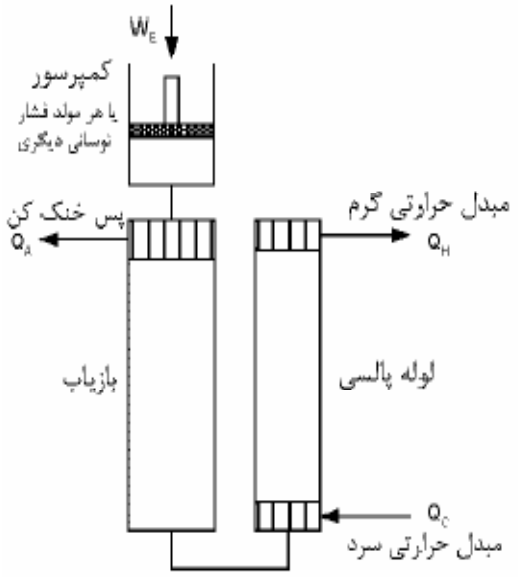
در آغاز وی توانست با یک کولر یک طبقه به دمای مطلق ۱۵۰ درجه کلوین و با یک یخچال دو طبقه به دمای مطلق ۱۲۰ درجه کلوین دست پیدا کند. چند سال بعد این یخچالها توانستند به ترتیب به دماهای مطلق ۱۲۰ درجه کلوین و۸۵ درجه کلوین نیز برسند. ولی کارآیی این یخچالها دلگرم کننده نبود و راندمان بسیار پایینی داشتند. در اواخر دهه ۱۹۶۰ لوله پالسی ها بعنوان یک یخچال مفید برای کاربرد های عملی کنار گذاشته شدند.

---

[۷] Gifford
[۸] Longsworth
[۹] Syracuse

۱-۵ ساختمان یخچال لوله پالسی

به طور ساده، یخچال لوله پالسی شامل لوله بلند باریکی است که یک طرف آن بسته بوده و سمت دیگر آن باز است. یک مبدل حرارتی به منظور دفع گرمای تولید شده در خلال فرآیند تولید سرما، در انتهای بسته قرار داشته و مبدل حرارتی دیگری که با محیط سرد در ارتباط است در سمت باز لوله قرار دارد. این مجموعه از طریق یک بازیاب حرارتی و پس خنک کن، به مولد نوسان فشار، که می تواند یک کمپرسور، شیر گردشی [۱۰] و یا یک مولد ترمواکوستیکی باشد، متصل می باشد. این یخچال که موسوم به یخچال لوله پالسی نوع اولیه [۱۱] است، توسط گیفورد و لانگس ورث معرفی گردید. بعدها با پیشرفت های بیشتر در این زمینه، پیکربندیهای متنوع تری از یخچالهای لوله پالسی بوجود آمدند، که در ادامه به آنها خواهیم پرداخت. در شکل ۱-۱ دیاگرامی از یک یخچال لوله پالسی اولیه نشان داده شده است.



شکل۱-۱ دیاگرام شماتیک یک یخچال لوله‌پالسی اولیه، به همراه اجزای تشکیل دهنده آن

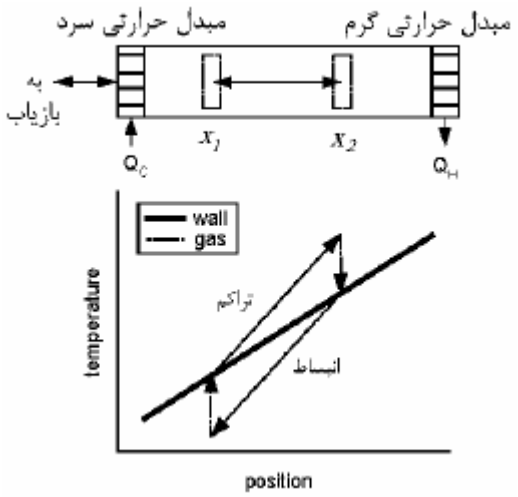
[۱۰] Rotary
[۱۱] Basic Pulse Tube Refrigerator(BPTR)

۱-۶ مکانیزم تولید برودت در یخچالهای لوله پالسی

یخچال لوله پالسی همانند یخچال گیفورد – مک ماهان برای تولید برودت از انبساط آزاد (ژولی) وانتقال انرژی به شکل گرما به محیط اطراف استفاده می کند. انبساط ژولی برای اولین بار در سال ۱۸۷۷، توسط کایلیتت [۱۲]برای مایع سازی اکسیژن و دیگر گازها مورد استفاده قرار گرفت.

انبساط آزاد (ژولی) که منجر به تولید برودت می شود، ناشی از آزاد شدن ناگهانی گاز متراکم از یک نقطه می باشد. این فرآیند می تواند درهر سطحی از یک محفظه بسته بوقوع بپیوندد.

انبساط ژولی تنها بخشی از چرخه گیفورد – لانگس ورث یا پمپاژ سطحی حرارت است، که طی آن برودت تولید می شود. برای تشریح مکانیزم تولید برودت در یخچال لوله پالسی (شکل ۱-۲)، المان کوچکی از گاز را در مکان x_1 از ابتدای لوله در نظر می گیریم. فرض کنید که در ابتدا این المان در تعادل دمایی با جداره لوله پالسی باشد.



شکل۱-۲ دیاگرام شماتیک لوله‌پالسی و مکانیزم سرمایش آن

[۱۲] Cailletet

با افزایش فشار گاز در لوله پالسی از سوی کمپرسور، انرژی داخلی المان گاز و در نتیجه دمای آن افزایش می یابد. در این لحظه المان گاز به موقعیت x_1 رسیده است. در موقعیت x_2 فشار گاز به ماکزیمم مقدار خود رسیده و متعاقب آن دمای گاز نیز به حداکثر مقدار خود می رسد. دراین لحظه به المان گاز فرصت کوتاهی داده می شود تا با جداره لوله پالسی در انتهای بسته آن، به تعادل دمایی برسد. در این هنگام شیر خروج گاز باز شده و مرحله انبساط آزاد آغاز می گردد. در این مرحله در اثر انبساط گاز، انرژی داخلی المان گاز و در نتیجه دمای آن کاهش می یابد. در پایان این مرحله که فشار به پایین ترین سطح خود می رسد، المان گاز به موقعیت اولیه اش، x_1، بازگشته است. اما این بار دمای آن از دمای جداره لوله پالسی در ناحیه سرد، پایین تر است. بنابراین می تواند مقداری گرما از مبدل حرارتی سرد جذب کند تا دوباره به تعادل دمایی با جداره لوله پالسی برسد. بدین ترتیب چرخه کامل می گردد.

فرآیندی که در بالا تشریح گردید، موسوم به پدیده پمپاژ سطحی حرارت است. پمپاژ سطحی حرارت ناشی از اندرکنش غیر معمول بین جابجایی سیال در طول یک سطح، تغییر انرژی در سیال و تبادل حرارت با سطح در نتیجه تغییر متناوب فشار گاز می باشد. از آنجا که این اثر در هر حجمی اتفاق می افتد، چندین عامل وجود دارد که این اثر را افزایش دهند.

اولا" جریان باید آرام و یکنواخت باشد، به طوری که یک الگوی منظم و نه تصادفی از پمپاژ حرارتی برقرار باشد.

دوم اینکه وقتی گاز در موقعیت های حدی خود قرار دارد تبادل حرارت با دیواره ها باید نسبت به حرارتی که در هنگام حرکت گاز مبادله می شود، بزرگ باشد.

در اینجا فرض می شود که دراگ ناشی از لزجت سیال وجود ندارد. به عبارت دیگر فرض می شود که پروفیل سرعت در مقطع عرضی لوله در هر نقطه یکنواخت است. اگر این فرض، با فرض کوچک بودن انتقال حرارت سیال با لوله در خلال فرآیند تغییر فشار (که در بند قبل بدان اشاره شد) در نظر گرفته شود، لذا می توان نتیجه گرفت که المان گاز در خلال مراحل انبساط و تراکم یک مسیر ایزونتروپیک را طی می کند.

در هر نقطه معین از طول دیواره، دما دارای مقداری بین دمای گاز مجاور آن (وقتی که فشار پایین است) و دمای گاز وقتی که فشار بالاست، خواهد بود. حرارت با دیواره مبادله شده و در طول آن تا انطباق دمای گاز

با دمای دیواره در سراسر طول لوله پمپ خواهد شد. نسبت فشارهای کوچک ۱/۵ تا ۲ مکانیزمی را سبب می شود که در نتیجه آن عمل پمپاژ حرارت صورت خواهد پذیرفت. می توان نشان داد که تغییرات دمای بوجود آمده در دیواره ها به نسبتهای حجمی در لوله بستگی دارد.

دراگ لزجتی بر روی سطوح لوله باعث وقوع جریان ثانوی [۱۳] در لوله پالسی می شود، که این خود منجر به انتقال حرارت رسانایی محوری در لوله می شود. بدیهی است که جهت این انتقال حرارت از سمت انتهای گرم لوله پالسی به سمت انتهای سرد آن می باشد، که این واقعه اثر نامطلوبی روی راندمان یخچال خواهد داشت.

پدیده پمپاژ سطحی حرارت از نظر کیفی برای تمام المانهای گاز مشابه است، ولی از نظر کمی به گونه ایست، که هرالمان، چرخه متفاوتی راطی می کند. از این نظر چرخه لوله پالسی را به راحتی نمی توان مانند چرخه های ترمودینامیکی دیگر مانند برایتون و استرلینگ و غیره بر روی دیاگرامهای T-S مورد بررسی قرار داد. این مساله باعث شده که درک صحیح فرآیندهای فیزیکی حادث در یخچالهای لوله پالسی با مشکلاتی مواجه شود. بدین خاطر است که از آغاز اختراع این وسیله، محققین مختلفی سعی در توصیف فرآیندهای فیزیکی حادث در آن کرده اند، که حاصل آن یک سری تئوری ها ونظریات ترمودینامیکی است که هر یک به گونه ای سعی دارند این فرآیند ها را توصیف و توجیه کنند. از جمله این تئوریها می توان به عدم تقارن ترمودینامیکی و «جریان انتالپی» اشاره کرد.

۱-۷ انواع پیکر بندیهای مهم یخچال لوله پالسی

همانطور که پیش از این نیز اشاره شد، در اواخر دهه ۱۹۶۰ یخچالهای لوله پالسی علیرغم تمام مزایای منحصر بفردی که داشتند، عملا" بعنوان یخچالی که کاربرد عملی داشته باشد، کنار گذاشته شدند.

این موضوع بیشتر به این خاطر بود، که این وسیله از راندمان ترمودینامیکی بالایی، که قابل رقابت با دیگریخچالها باشد، برخوردار نبود. با این حال هیچگاه از صحنه تحقیقات دانشگاهی کنار نرفت و همچنان یکی از موضوعات مورد علاقه محققین و پژوهشگران به حساب می آمد.

[۱۳] Secondary Flow

از جمله افرادی که در این زمینه تا سالهای پیش از ۱۹۸۰ قدمهای موثری برداشت،آقای دکتر پیتل کیتل [۱۴]از مرکزتحقیقاتی ناسا بودند. ایشان در سال ۱۹۸۱ در شانزدهمین کنفرانس بین المللی فیزیک دما پایین، پتانسیل کاربرد فضایی یک یخچال با تنها یک عضو متحرک را عنوان کردند. مزایای مهمی از قبیل قابلیت اطمینان بالاتر و هزینه پایین تر نسبت به یخچالهای استرلینگی و نیز جرم و هزینه کمتر و طول عمر بیشتر در مقایسه با یخچالهای متداول را برشمرده وعنوان نمود که مزیت مهم دیگر این یخچالها این است که هیچ عضو متحرکی در ناحیه دما پایین ندارند و لذا باعث طول عمر زیاد و نیز حذف ارتعاشات می شود. علاوه بر این لوله پالسی دارای فن آوریهای مشابهی با یخچالهای استرلینگی است. از این گذشته در طرح آن دیگر نیازی به یاتاقانهای خمیده [۱۵]و کاسه نمد برای آب بندی کمپرسور نیست. این ماجرا در حقیقت آغازی برای پیشرفتهای جدی در یخچالهای لوله پالسی بود.

در سال ۱۹۸۳، حرکتی موثر برای توسعه و پیشرفت یخچالهای لوله پالسی آغاز گردید. در این سال دکتر میکولین[۱۶]، از دانشگاه صنعتی بائومن مسکو در روسیه پیکربندی جدیدی از یخچال لوله پالسی را معرفی کرد که راندمان این یخچال را به مقدار قابل ملاحظه ای بهبود بخشید. وی به جای انتهای بسته لوله پالسی در یخچالهای لوله پالسی نوع اولیه، یک اریفیس ویک مخزن جایگزین کرد. این پیکربندی به یخچال لوله پالسی اریفیسی[۱۷] مشهور است و با ابداع آن نگاه جامعه علمی به یخچالهای لوله پالسی به عنوان یخچال کرایوژنیکی با قابلیتهای کاربرد عملی تغییر کرد وسیر رشد تصاعدی آن آغاز شد. از این به بعد پیکربندیهای مختلفی از یخچالهای لوله پالسی ابداع شدند که هر یک به نوبه خود سعی در ارتقاء راندمان ترمودینامیکی این وسیله داشته اند، تا آنجا که یخچالهای لوله پالسی امروزه یکی از مطرحترین دستگاههای تولید دمای پایین در دمای کرایوژنیک می باشند. در این قسمت به تشریح مختصر بعضی از مهمترین پیکربندیهای بوجود آمده پرداخته می شود.

[۱۴] Peter Kittle
[۱۵] Flexure-bearing
[۱۶] Mikulin
[۱۷] Orifice pulse tube refrigerator(OPTR)