

یکپارچه سازی تحقیق و طراحی: یک مرکز تشخیص آکوستیک نشت بخار

نیکولاس آناستاسیادیس دانشگاه تگزاس A & M
در گالوستون
nikogr24@neo.tamu.edu
Loyd L. Beacham IV Texas A & M
دانشگاه در گالوستون
lamar_beacham@neo.tamu.edu
دانیل دانبار
دانشگاه تگزاس A & M در گالوستون
daniel87dunbar@neo.tamu.edu
متیو سی کارولدانشگاه تگزاس A & M در
گالوستون
carrollm@tamug.edu

چکیده یک پروژه ارشد Capstone توسط سه دانشجوی ارشد مقطع کارشناسی انجام می شود که به موجب آن تسهیلاتی برای ایجاد پروفیل های صوتی برای نشت بخار کم فشار در حال طراحی و ساخت است. سپس از این تاسیسات در تلاش های تحقیقاتی برای توسعه سیستم های نظارت بر نشت موثرتر در دیگهای بازیابی کرافت استفاده می شود که در کارخانه های خمیر و کاغذ برای سوزاندن زیاله های آلی از فرآیند تولید خمیر و تولید برق استفاده می شود. انفجار آب گداخته زمانی که آب حاصل از نشت بخار با ترکیبات زائد غنی از سدیم واکنش نشان می دهد، برای عملکرد آنها خطرناک است. این نگرانی وجود دارد که سیستم های نظارت بر نشت که در حال حاضر مورد استفاده قرار می گیرند به دلیل عدم اطمینان در مورد امضاها های صوتی نشت ها بی اثر باشند. تاسیساتی که قرار است ساخته شود شامل یک دیگ برقی کوچک، یک مخزن مهار نشستی، مخزن نگهدارنده و شیرها و لوله کشی های مرتبط است. لوله های نشستی از مواد و هندسه های مختلف به یک فلنج در مخزن مهار نشت متصل می شوند و با نشت بخار تولید شده توسط دیگ بخار از این لوله ها، آشکارسازهای صوتی در مخزن پروفیل های صوتی نشستی مرتبط را اندازه گیری می کنند. انتشار صدا از طریق هوا، آب و گل و لای و سایر مواد مشابه مواد موجود در دیگ کرافت اندازه گیری می شود. از نتایج چنین تحقیقاتی می توان برای طراحی سیستم های نظارتی استفاده کرد که به طور موثر بین نویز نشت بخار و نویز پس زمینه تمایز قائل می شوند. از نقطه نظر آموزشی، نویسندگان علاوه بر همکاری با یک عضو هیئت علمی در مشارکت در یک تلاش تحقیقاتی جهانی برای حل یک مشکل عملی مهندسی، تجربیات ارزشمندی در طراحی مهندسی به دست خواهند آورد. مقدمه هدف از این پروژه کاپستون ارشد طراحی و ساخت تاسیساتی است که به موجب آن آزمایش هایی برای تعیین پروفیل های آکوستیکی انواع مختلف انجام شود

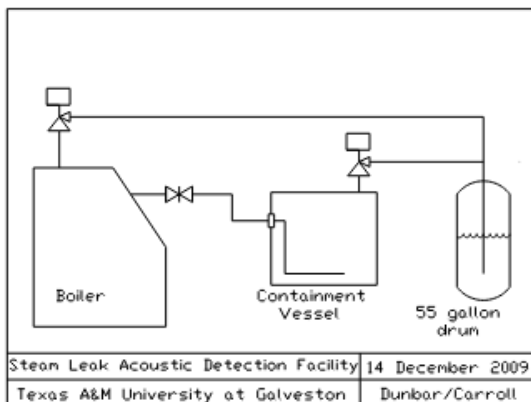
نشت بخار. نتایج این آزمایش ها ممکن است برای طراحی آشکارسازهای نشت بخار صوتی موثرتر در دیگ های بازیابی کرافت مورد استفاده قرار گیرد و ممکن است کاربردهای دیگری نیز داشته باشد. طراحی اصلی نیاز به یک دیگ بخار کوچک برای تولید بخار کم فشار دارد که از طریق لوله های مسی به یک مخزن مهار بخار جداگانه و مهر و موم شده منتقل می شود. قسمت بالای مخزن مهار را می توان باز کرد تا از مایشگران بتوانند به داخل کشتی دسترسی داشته باشند تا آزمایش ها را انجام دهند. آزمایش ها با اتصال لوله های در پوش دار با نقص های از قبل موجود به خط بخار ورودی انجام می شود و انتظار می رود که بخار با سرعت های مختلف جریان از طریق این سوراخ ها یا ترک های لوله ها به داخل مخزن نشت کند. سنسورهای صوتی در نقاطی در امتداد کف مخزن قرار می گیرند تا توان صوتی را در فرکانس های متغیر اندازه گیری کنند و این اندازه گیری ها به یک سیستم جمع آوری داده ارسال می شوند. انتظار می رود خروجی نهایی نموداری از شدت اکوستیک به عنوان تابعی از فرکانس باشد و امید است که از این اطلاعات بتوان برای طراحی استفاده کرد. دستگاه های تشخیص نشت بخار، به ویژه در دیگهای بازیابی کرافت، که مشخصات صوتی نشت بخار را با سرعت و دقت بیشتری از تشعشعات پس زمینه تشخیص دهد. BackgroundVakkilainen در ارائه شرح گسترده ای از روند بازیابی کرافت است که تمرکز اصلی تحقیقات انجام شده در این پروژه Capstone ارشد است [1]. اساساً، مواد شیمیایی پخت و پز مصرف شده و ترکیبات آلی محلول در مرحله شستشوی فرایند ساخت خمیر از خمیر جدا می شوند. مشروب ضعیف، سیاه و قلیایی حاصل حاوی حدود 12 تا 20 درصد مواد جامد آلی و معدنی است. سپس مشروب سیاه با فرایند تبخیر شامل گرمایش مستقیم یا غیرمستقیم و چشمک زدن مشروب متمرکز می شود. اواپراتورهای چند منظوره و بخار معمولاً استفاده می شود. مشروب سیاه غلیظ حاصل را می توان در دیگ بخار بازیابی کرافت سوزانده کرد تا انرژی برای تولید بخار و برق تولید شود. در بسیاری از موارد انرژی کافی برای تامین نیاز به بخار و برق کل آسیاب خمیر تولید می شود. اختراق مشروب سیاه در دیگ بخار بازیابی کرافت به طور مفصل مورد مطالعه قرار گرفته و توسط Hupa و Solin توصیف شده است [2]. این فرایند شامل چندین مرحله است. در مرحله اول یا خشک شدن، آب از قطره تبخیر شد. در مرحله دوم با تخریب گازهایی مانند متان، دی اکسید کربن، هیدروژن و سولفید هیدروژن آزاد می شوند. قطرات مشروب سیاه به طور قابل توجهی متورم می شود و شعله ای قابل مشاهده ظاهر می شود. هر دوی این مراحل عمدتاً در حفزه فوقانی دیگ رخ می دهد، اما در مراحل بعدی یک بستر "زغال" که همچنان می سوزد، روی لوله های آب در پایین دیگ تشکیل می شود. این زغال مشروب سیاه در درجه اول حاوی کربن، سدیم کربنات، سولفات سدیم و سولفید سدیم است و یک واکنش اختراق اولیه شامل تشکیل سولفات سدیم از سولفید سدیم است:



غلبه ترکیبات سدیم و سدیم در ترکیب بستر زغال سنگ یک نگرانی عمده است. Heinävaara اندازه گیری ترکیب بستر زغال را انجام داده و مشخص کرده است که بستر زغال کمی بیش از 40٪ سدیم وزنی دارد و بیش از 90٪ وزنی از ترکیبات سدیم که در بالا توضیح داده شد تشکیل شده است [3]. از آنجایی که لایه ذوب غنی از سدیم لوله های آب را می پوشاند، حتی یک نشت کوچک آب به داخل کوره می تواند باعث انفجار آب ذوب شود. [1] Vakkilainen انفجار همراه و خطر ایمنی را به شرح زیر خلاصه می کند:

مجموعه مقالات کنفرانس سالانه خلیج فارس جنوب غربی 2010 ASEE، دانشگاه ایالتی مکزیک
نیر کپی رایت © 2010، انجمن آمریکایی آموزش مهندسی

این نیرو معمولاً کافی است تا تمام دیواره های کوره از شکل خارج شوند. ایمنی تجهیزات و پرسنل مستلزم خاموش شدن فوری دیگ بخار بازیابی در صورت وجود احتمال ورود آب به کوره است. دیگهای بخار Allrecovery باید به یک توالی خاموش شدن خودکار ویژه مجهز شوند. جاروین، هیلبراند، کارول و میتین روش فعلی نظارت بر نشت آب در دیواره زیرین را با استفاده از سنسورهای انتشار صوتی که در فرکانس های بسیار بالا (100 کیلوهرتز یا بیشتر) حساس تر هستند، تجزیه و تحلیل کرده اند [4]. پس از تشخیص نشتی، توالی خاموش شدن خودکار که در بالا توضیح داده شد را می توان انجام داد، اما یکی از نتایج مهم این مطالعه این بود که ممکن است به دلیل تضعیف صدا در زغال شده، تشخیص به موقع این نشت امکان پذیر نباشد. همین چهار محقق همچنین یک مدل تضعیف فرکانس پایین را توسعه داده و ارائه خواننده کرد که امکان تشخیص نشت از طریق ارتعاشات در خود دیواره پایینی را بررسی می کند، اما عدم قطعیت عمده با فرکانس های واقعی صدا مرتبط است که توسط نشت های مختلف بخار ممکن است [5]. آیا نشت صدای خش خش با فرکانس بالا است؟ غرش فرکانس پایین؟ از این زمان، "اصطلاح منبع" که مبنای طراحی این آشکارسازها را تشکیل می دهد، هنوز مشخص نشده است و این فرآیند است که پروژه Capstone ارشد به آن می پردازد. توضیحات سیستم تشخیص آکوستیک نشت بخار شکل 1 طرح اصلی مرکز تشخیص آکوستیک نشت بخار را نشان می دهد. یک دیگ بخار برقی کم فشار قابل حمل که به راحتی در آزمایشگاه حرارت/سیالات موجود است، به عنوان منبع بخار استفاده می شود. فشار بخار را می توان بین 10 تا 15 psig تنظیم کرد و شیر تسکین دهنده نیز می تواند بر این اساس تنظیم شود. در حال حاضر دیگ بخار 10 psig تولید می کند و شیر تخلیه تنظیم شده است تا در 11 psig بلند شود، ترتیبی که برای تسهیلات تشخیص مناسب است. دیگ بخار از این نظر قابل حمل است که بر روی یک گاری نصب می شود که می تواند در آزمایشگاه حمل شود و اجزای باقیمانده بر روی یک گاری مشابه نصب می شوند که می تواند در مجاورت دیگ در هنگام استفاده برای تامین بخار به مرکز تشخیص قرار گیرد (بدیهی است که دیگ کاربردهای دیگری نیز دارد). بخار از طریق لوله کشی به یک اتصال فلنج در بالای دیواره جلویی مخزن مهار منتقل می شود که تقریباً دو فوت طول، یک فوت عرض و یک فوت ارتفاع دارد. در نتیجه تجزیه و تحلیل حرارتی سیستم که بعداً توضیح داده خواهد شد، مشخص شد که مخزن مهار باید فشار طراحی یکسانی با دیگ بخار داشته باشد و یک شیر تخلیه نیز در 11 psig گنجانده شده است. هر دو دریچه تسکین دهنده به یک درام 55 گالن نیمه پر از آب سرد خالی می شوند. این تاسیسات به شرح زیر عمل خواهد کرد: لوله های درپوش شده از مواد مختلف که با نقص های از قبل موجود از هندسه های مختلف مشخص شده اند تهیه می شوند و این نمونه ها بر روی یک اتصال فلنج / اتحادیه پیچ می شوند. دیگ بخار به فشار می رسد که در آن زمان فشار بخار باعث انتشار نقص می شود تا زمانی که محفظه لوله شکسته شود و نشت بخار رخ دهد. آشکارساز هاپروفیل های صوتی نشانی را قبل و بعد از انتشار بخار از لوله اندازه گیری می کنند. بخار همیشه در ساختار مهار محدود می شود و حتی در صورت بلند شدن دریچه تسکین دهنده، که به طور معمول انتظار نمی رود، بخار به یک درام 55 گالن و زیر سطح آب در آنجا منتقل می شود. این ظرف مانند یک کندانسور برای بخار عمل می کند. کندانسور امکان دفع ایمن بخار را بدون نیاز به اصلاح زیرساخت آزمایشگاه فراهم می کند.



شکل 1: چیدمان - تسهیلات تشخیص آکوستیک نشت بخار

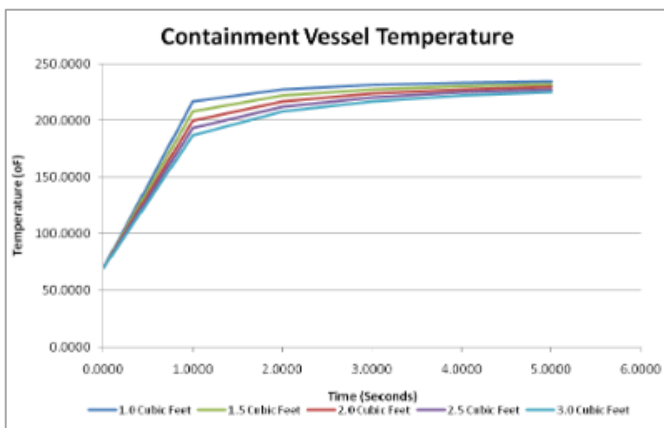
مخزن مهار یا یک درب جداگانه که به ظرف پیچ می شود مهر و موم می شود و تعداد و اندازه پیچ های مورد نیاز برای بهره برداری ایمن تاسیسات محاسبه شده است که در ادامه این مقاله توضیح داده شده است. در پایان هر آزمایش آزمایشی، شیر توقف بخار اصلی بسته می شود و مخزن مهار اجازه دارد تا در دمای اتاق خنک شود. درپچه های تخلیه را می توان به صورت دستی بلند کرد تا در صورت لزوم بخار باقیمانده را به کندانسور تخلیه کندانسور کند. سپس نمونه لوله کشی برداشته می شود تا یک آزمایش از مایشی جدید انجام شود. برای شبیه سازی دقیق تر شرایط میرایی صوتی در دیگ بازیابی کرافت ، همچنین می توان ظرف مهار را با سایر مواد جامد و سیال مانند آب ، گل و رس پر کرد. از آنجایی که حسگرها در کف قرار دارند، پروفیل های ضعیف شده نیز ممکن است برای مدل های اعتبارسنجی تضعیف شده که قبلا توسط محققانی که قبلا مورد بحث قرار گرفتند، به دست آید. بیل ها و پمپ های شناور برای حذف این مواد از ظرف در دسترس خواهند بود. محاسبات طراحی برای تاسیسات برخی از محاسبات اصلی طراحی برای تاسیسات شامل تجزیه و تحلیل حرارتی عبور بخار از دیگ بخار ، از طریق لوله های نشئی و داخل مخزن مهار و تجزیه و تحلیل مکانیکی تعداد و اندازه پیچ های مورد نیاز برای پوشش مخزن مهار است. یک سوال عمده که باید حل شود این بود که آیا مخزن مهار باید برای همان فشار دیگ بخار طراحی شود یا اینکه فشار طراحی پایین تر امکان پذیر است. از آنجایی که خط ورودی به مخزن لوله 3/4 اینچی است، یک مورد محدود کننده در نظر گرفته شد که در آن لوله شکسته می شود

کاملاً باز و بخار به سرعت از طریق لوله باز به داخل ظرف عبور می‌کند. نشت بخار بزرگ به داخل رگ به سختی یک عبور منظم از حالت های تعادل است که به طور معمول در دوره های ترمودینامیک در مقطع کارشناسی مورد بحث قرار می‌گیرد. با این وجود، امکان توسعه محاسبات بر اساس مورد "جریان خفه شده" از طریق دهانه لوله وجود داشت. در "جریان خفه شده" بخار با سرعت صدا از لوله خارج می‌شود و هیچ تغییر دیگری در شرایط خروجی جریان را بیشتر افزایش نمی‌دهد. خواننده توجه خواهد کرد که شرایط فشار خروجی (یک دیگ بخار 10 psig که به فشار اتمسفر برای نسبت فشار حدود 0.6 ختم می‌شود) کاملاً فرض جریان خفه شده را تضمین نمی‌کند، که به نسبت فشار زیر نیاز دارد.

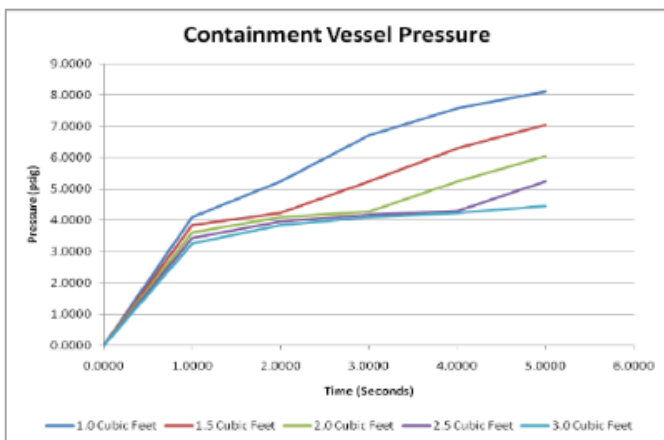
0.5283، اما مطمئناً عدد مایع بخار بسیار نزدیک به 1 است و خطاها در جهت محافظه کارانه هستند. تجزیه و تحلیل دقیق تر شامل محاسبات جریان Fanno به دلیل اثرات اصطکاک بر بخار خروجی از لوله ها و تغییر فشار با ورود بخار به مخزن است، اما این محاسبات به طور کلی شامل پیچیدگی در سطح فارغ التحصیل است، و تنها نیاز این بود که به این سوال کلی پاسخ داده شود که آیا مخزن مهار به اندازه کافی سریع پر می‌شود تا به فشار طراحی دیگ بخار برای مخزن نیز نیاز داشته باشد. از این رو، فرمول استاندارد "جریان خفه شده" [6] برای تعیین سرعت جریان جرمی بخار ورودی به مخزن استفاده شد:

$$\text{سرعت جریان جرمی} = A \cdot P_0 g_c (k/R_g T_0)^{1/2} \quad (2)$$

$A^* =$ مساحت جریان P_0 = فشار رکود T_0 = دمای رکود $g_c = 32.174 \text{ lbf} \cdot \text{ft} / \text{s}^2$ (ثابت تبدیل واحد برای واحدهای انگلیسی) $k(1) =$ نسبت گرمای ویژه $R =$ ثابت گاز منفرد برای هوانرخ جریان برای بخار برای این شرایط برای تعدادی از اندازه های مخازن مهار متفاوت تعیین شد. برای لوله 3/4 اینچی مورد استفاده در طراحی، سرعت جریان 0.3017 lbm/s است. سپس افزایش دما و فشار داخل مخزن در طول زمان با استفاده از تعادل انرژی تعیین شد که به موجب آن بخار ورودی داغ انرژی خود را به هوای خنک تر منتقل می‌کند (که در ابتدای آزمایش آزمایشی در دمای اتاق فرض می‌شود). چندین گشتی مختلف در نظر گرفته شد و نتایج مربوط به دمای مخزن و فشار مخزن در شکل های زیر نشان داده شده است:



شکل 2: دمای مخزن مهار - نشت بخار باز



شکل 3: فشار مخزن مهار - نشت بخار باز

مجموعه مقالات کنفرانس سالانه خلیج فارس-جنوب غربی ASEE 2010، دانشگاه ایالتی مک
نیز کپی رایت © 2010، انجمن آمریکایی آموزش مهندسی

مشخص شد که دما و فشار در مخزن بسیار سریع افزایش می یابد و مدت ها قبل از تکمیل مرحله جمع آوری داده ها برای هر آزمایش آزمایشی به دما و فشار بخار نزدیک می شوند. از این رو تصمیم گرفته شد که مخزن مهار را به گونه ای طراحی کنند که دما و فشار کامل دیگ بخار را در خود جای دهد. همچنین مشخص شد که برای چند ثانیه اول، فشار در درجه اول توسط دمای هوا کنترل می شود. بعداً، فشار اشباع بخار در دمای مخزن عامل غالب بود. بازرسی نمودارها همچنین به نویسندگان کمک کرد تا اندازه بهینه مخزن مهار را تعیین کنند. حداقل اندازه باید به گونه ای باشد که جمع آوری داده ها بتواند قبل از یکسان سازی فشارها انجام شود (که مطمئناً انتظار نمی رود در فضای بسیار بزرگتر دیگ بخار بازیابی کرافت رخ دهد)، اما به اندازه کافی کوچک باشد تا روی سبد خرید قرار بگیرد و از کشف عناصر گرمایشی دیگ بخار به دلیل نشت بیش از حد بخار جلوگیری کند. از این ملاحظات حجمی تقریباً دو فوت مکعب برای مخزن مهار انتخاب شد. نویسندگان همچنین علاقه مند بودند که چگونه این میزان نشت در مقایسه با سرعت جریان بخار طراحی دیگ بخار، یعنی سرعت ثابتی که دیگ بخار می تواند بخار را در مدت زمان طولانی تأمین کند. برای تعیین این موضوع، بار گرمایش طراحی شده برای دیگ بخار با تغییر اینتالیتهی بخار در عبور از حالت مایع ساب خنک شده در دمای اتاق به حالت بخار در 10 psig تقسیم شد:

$$\text{سرعت جریان بخار طراحی} = Q/\Delta h \text{ (3)}$$

Q = بار گرمایش طراحی برای دیگ بخار (hΔBtu / hr 30000 = تغییر در انتالپی در) P = 15 psia
psia، در واقع 30 psia استفاده شد) تقریب راجع [6] برای یک مایع ساب خنک شده برای تعیین انتالپی آب در دمای اتاق استفاده شد:

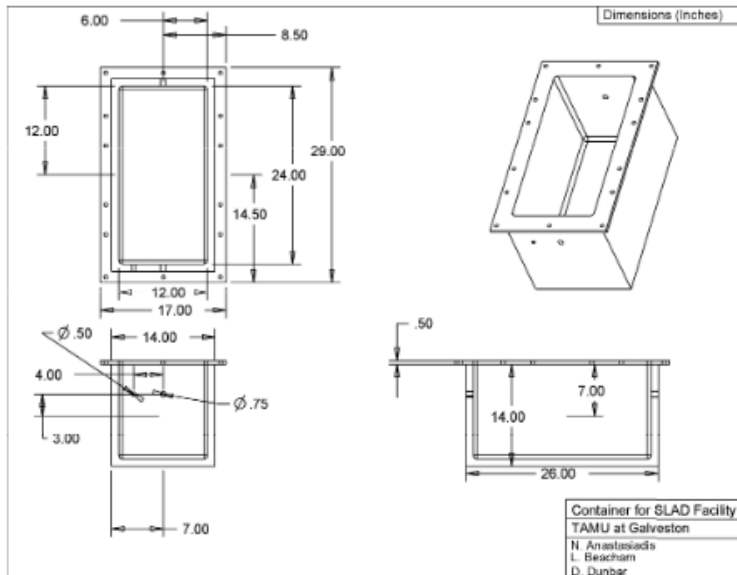
$$\text{hin} = \text{hsat liq @ } 70 \text{ F} + \text{vsat liq @ } 70 \text{ F (P - Psat) (4)}$$

hin = انتالپی آب ورودی به دیگ (مایع ساب خنک شده در دمای اتاق) @ 70 F = انتالپی مایع اشباع در 70 درجه FPsat = فشار اشباع برای دمای اشباع 70 درجه فارنهایت یا انتالپی ورودی و خروجی به ترتیب 177/38 Btu/lbm و 89/1165 Btu/lbm، دبی بخار طراحی شده 6/26 lb/hr تعیین شد. این با نرخ نشت 1086 lbm/hr و 0.3017 lbm/s مقایسه شد که بیش از 40 برابر نرخ طراحی بود. بنابراین نویسندگان نتیجه گرفتند که دیگ بخار قطعاً نمی تواند به طور مداوم با نشت بخار همگام شود! فشار طراحی مخزن مهار نیز برای تعیین تعداد پیچ و مهره های 5/8 اینچی مورد نیاز برای محکم کردن صحیح درب مخزن مهار در طول آزمایش های تجربی استفاده شد. فرمول استاندارد نشان داده شده در زیر، که توسط نویسندگان دانشجو در بخش سخنرانی دوره SeniorCapstone Design آموخته شده و مشابه فرمول های ارائه شده در مرجع [7]، مورد استفاده قرار گرفت:

مجموعه مقالات کنفرانس سالانه خلیج فارس جنوب غربی ASEE 2010، دانشگاه ایالتی مک
نیر کپی رایت © 2010، انجمن آمریکایی آموزش مهندسی

$$n (SpAt - Fi) / CP > 1 \quad (5)$$

Sp = مقاومت اثبات تقسیم بر ضریب ایمنی At = مساحت نخ $Fi =$ نیروی پیش بار بر روی پیچ C = کسری از بار خارجی حمل شده توسط پیچ P = بار کششی خارجی = تعداد پیچ های مورد نیاز که $n > 1$ ، به طوری که تنش پیچ کمتر از مقاومت اثبات تقسیم شده توسط ضریب ایمنی مناسب باشد ، منجر به تعیین حداقل 14 پیچ و مهره 5/8 اینچی می شود. طراحی مخزن مهارمانطور که قبلا گفته شد، مشخص شد که مخزن مهار باید تقریباً 2 فوت مکعب حجم داشته باشد و درب باید حداقل با 14 پیچ محکم شود. همچنین اتصالات برای بخار ورودی و یک شیر تسکین دهنده 11 psig و همچنین دهانه ای برای سیم کشی به سنسورهای صوتی مورد نیاز بود. بر اساس این ملاحظات، شناور به شرح زیر طراحی شده است:



شکل 4: طراحی مخزن مهار

مجموعه مقالات کنفرانس سالانه خلیج فارس جنوب غربی 2010 ASEE، دانشگاه ایالتی مک
نیز کپی رایت © 2010، انجمن آمریکایی آموزش مهندسی

نتیجه‌گیری‌امید است پس از تعیین مشخصات آکوستیک نشت بخار با استفاده از این تسهیلات، اطلاعاتی برای کمک به مهندسان صنایع خمیر و کاغذ در ایجاد سیستم‌های ایمنی برای شناسایی سریع و قابل اطمینان نشت بخار و خاموش کردن دیگ‌های بازیابی کرافت در صورت بروز این نشتی‌ها قبل از پارگی عمده لوله و آسیب ناشی از آن به دیگ‌های بخار ارائه شود. بنابراین از ضرر مالی به این صنایع و شاید در موارد شدید، آسیب‌های انسانی نیز جلوگیری می‌شود. مراجع

1. E. Vakkilainen، دیگ‌های بازیابی کرافت - اصول و عملکرد، شابک 6-64-764-951 (2003)

2. P. Solin و M. Hupa، "رفتار احتراق قطرات مشروب سیاه"، TAPPI Proceedings کنفرانس بین‌المللی بازیابی مواد شیمیایی، نیواورلئان، لوئیزیانا، کتاب 3 (1985)

3. A. Heinävaara، "تجزیه و تحلیل دیگ بخار بازیابی"، ماشین آلات Ahlstrom، گزارش داخلی (1991)

4. J. Miettinen و V. Jarvinen، R. Hildebrand، M. Carroll، "بررسی استفاده از روش‌های صوتی برای تشخیص نشت در دیگ‌های بازیابی مشروبات الکلی سیاه"، مجموعه مقالات کنفرانس بین‌المللی دینامیک، ابزار دقیق و کنترل 2006، کونرتارو، مکزیک (2006)

5. R. Hildebrand، M. Carroll، V. Jarvinen و J. Miettinen، "یک مدل اختلاف محدود برای اندازه‌گیری صدای فرکانس پایین در دیگ‌های بازیابی کرافت"، نشست شش ماهه انجمن آکوستیک آمریکا، بالتیمور، مریلند (2010)

6. M. Boles و Y. Cengel، ترمودینامیک: یک رویکرد مهندسی، چاپ ششم، شابک 9-352921-07-0-978، مک گراو هیل، بوستون، ماساچوست (2008)

7. C. Mischke و J. Shigley، طراحی مهندسی مکانیک، چاپ پنجم، شابک 5-056899-07-0، مک گراو هیل، نیویورک (1989)

مجموعه مقالات کنفرانس سالانه خلیج فارس-جنوب غربی ASEE 2010، دانشگاه ایالتی مک
کپی رایت © 2010، انجمن آمریکایی آموزش مهندسی نیز