

بررسی اثر تشکیل برفک بر بازدهی کندانسورهای واحد جداسازی هگزا فلوراید اورانیوم

هادی شارع محمدی^{(۱)*}، سید محمد قریشی^(۱)، مصطفی امید^(۲)

(۱) دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی شیمی

(۲) دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی شیمی

چکیده:

این تحقیق به منظور بررسی اثر تشکیل برفک (*mist*) بر بازدهی کندانسور از نوع پوسته لوله واحد جداسازی UF_6 در مجتمع UCF اصفهان (با همکاری شرکت سوره) انجام گردید. هدف عمده این تحقیق پیش‌بینی شرایط بهینه کارکرد به منظور کاهش میزان اورانیوم خروجی بصورت برفک از سیستم کندانسور بود. در این تحقیق معادلات شرایط تشکیل برفک درون کندانسورها بدست آمده و با استفاده از مدل تدوین شده مقدار برفک خروجی از کندانسور تحت شرایط عملیاتی و تاثیر آن بر کارکرد کندانسور معین گردیده است. در نهایت با بررسی و تحلیل شرایط تشکیل برفک درون کندانسور، شرایط عملیاتی بهینه در این نوع کندانسورها به منظور کاهش تولید برفک انتخاب گردید. لازم به ذکر است تمام تحقیقات انجام شده قبل از سال میلادی ۲۰۱۶ صورت گرفته است.

کلید واژه‌ها: اورانیوم هگزا فلوراید، چگالش، کندانسور، برفک

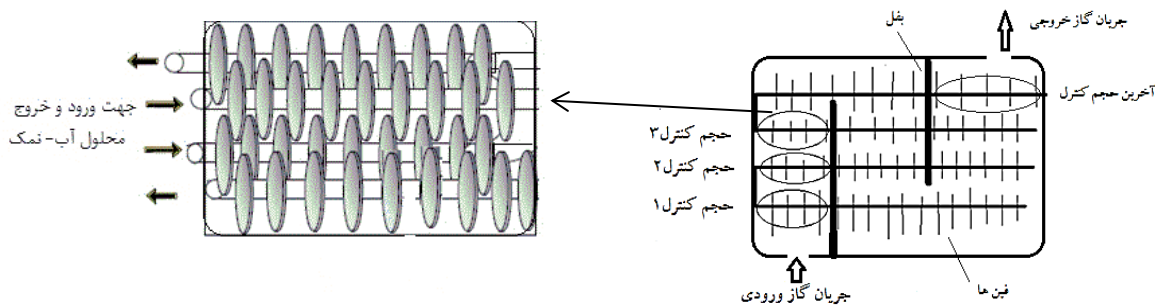
۱. مقدمه

چگالش به عنوان یکی از روش‌های مهم خالص‌سازی در صنایع شیمیایی و هسته‌ای به کار می‌رود [۱]. معمولاً در صنایع هسته‌ای موادی همچون UF_6 , WF_6 , ReF_6 , TiF_4 به وسیله‌ی فرآیند چگالش خالص‌سازی می‌شوند [۲]. مشکل اساسی در این فرآیند خروج اورانیوم از کندانسور بصورت برفک می‌باشد. در این حالت در اثر عواملی با وجود اینکه UF_6 درون کندانسور چگالش می‌یابد اما بر روی سطوح کندانسور ته‌نشین نمی‌شود و با گازهای دیگر بصورت دانه‌های ریز برفک‌گونه از کندانسور خارج می‌شود. خروج UF_6 بصورت برفک کاهش بازیابی آن و مسائل زیست محیطی را به همراه دارد. لذا هدف عمده این تحقیق پیش‌بینی شرایط مناسب کارکرد در راستای کاهش ضایعات اورانیوم می‌باشد. در صنعت جهت کندانس کردن گاز خروجی از راکتور فلوراسیون از کندانسورهای مخصوصی استفاده می‌شود. این کندانسورها در حقیقت مبدل‌های حرارتی از نوع پوسته لوله می‌باشند. سیال خنک کننده در این کندانسورها محلول آب - نمک است که دمای آن با توجه به اهداف عملیاتی تنظیم می‌گردد. گاز خروجی از راکتور فلوراسیون وارد قسمت پوسته‌ی کندانسور شده و پس از چگالش و

رسوب UF_6 ، با غلظت بسیار پایین از UF_6 از کندانسور خارج می‌گردد. در صنعت از دو کندانسور با ساختار کاملاً مشابه ولی با حجم‌های مختلف به صورت سری برای این هدف استفاده می‌شود.

عوامل بسیاری بر بازده این کندانسورها تاثیرگذار است. سافرانو و همکاران [۳] آزمایش‌هایی را برای بررسی تاثیر دمای سطح کندانسورهای سطحی بر بازده آن، برای چگالش تیتانیوم تترافلوراید (TiF_4) انجام داده‌اند. در این آزمایش‌ها نشان داده شده است که با کاهش دمای سطح کندانسور، مقدار برفک خروجی از آن افزایش می‌یابد و متعاقباً بازده آن به طور محسوسی کاهش می‌یابد. در تحقیقی دیگر که در سال ۲۰۰۶ توسط اسمولکین و همکاران [۲] انجام شد، یک مدل ریاضی برای محاسبه‌ی دمای بهینه چگالش در خصوص فلوراید های فلزی از جمله اورانیوم هگزافلوراید تدوین شد. در تحقیق مذکور، روش‌هایی برای محاسبه‌ی اندازه و جرم ذرات برفک تشکیل شده درون کندانسورهای سطحی پیشنهاد شده است. مطالعات بر روی سیستم‌های مشابه (مانند مخلوط بخار آب- هوا تحت چگالش) نشان می‌دهد یکی از عوامل تاثیر گذار بر بازدهی کندانسورهای ترکیبی، تشکیل برفک درون آن‌ها می‌باشد [۷-۴]. لذا در مدل‌های تدوین شده در خصوص کندانسورهای پوسته لوله اورانیوم هگزافلوراید نباید از تشکیل برفک صرف نظر کرد.

مدلسازی این کندانسورها توسط شارع محمدی و همکاران صورت گرفته است [۸]. در مدل مذکور، کندانسور به تعداد معینی حجم کنترل (شکل ۱) در جهت جریان گاز ورودی تقسیم شده است که هر یک از این حجم کنترل‌ها شامل یک ردیف از لوله‌های موجود در بین دو بفل می‌باشد. خروجی هر حجم کنترل، ورودی حجم کنترل بعدی را تشکیل می‌دهد. بدین ترتیب جریان گاز ورودی به سیستم، وارد اولین حجم کنترل شده و پس از عبور از حجم کنترل‌های بعدی در آخرین حجم کنترل از سیستم خارج می‌شود. خواص گاز متناسب با شرایط دما و فشار هر حجم کنترل تغییر می‌کند. بعد از طراحی و تدوین مدل، نتایج حاصل از آن با داده‌های آزمایشگاهی شرکت سوره اصفهان مقایسه شده است. مقایسه نتایج مدل با نتایج تجربی صنعتی در خصوص جرم چگالش یافته در کندانسور ۲ا و خواص گاز خروجی از کندانسور ۲ بیانگر دقت عمل بسیار بالای این مدل می‌باشد. میانگین خطای داده‌های حاصل از مدلسازی انجام شده نسبت به داده‌های صنعتی برای جرم چگالش یافته در کندانسور اول و دوم به ترتیب ۱/۳۹ و ۲/۲۴ درصد می‌باشد که اثبات مدل را به همراه دارد.



شکل (۱). نحوه تخصیص حجم کنترل‌ها درون کندانسور

در تحقیق حاضر به منظور بهبود مدل‌سازی، شرایط تشکیل برفک درون کندانسور در نظر گرفته شده است و معادلات آن بصورت کامل به معادلات مدل‌سازی مذکور اضافه گردید و سپس معادلات مدل با استفاده از نرم افزار MATLAB حل گردید و نتایج و نمودارهای مورد نیاز استخراج گردید.

۲. تشکیل برفک درون کندانسور

برفک به ذراتی گفته می‌شود که در دماهای پایین درگازهای حامل بخار قابل کندانس تشکیل می‌شوند و به صورت ذرات معلق در این گازها ظاهر می‌گردند. برفک‌ها بر روی سطوح کندانسور ته‌نشین نمی‌شوند و به همراه گاز از کندانسور خارج می‌شوند. فرآیند چگالش غیرهمگن یا تشکیل برفک زمانی اتفاق می‌افتد که دمای گاز زیر نقطه‌ی سه‌گانه باشد و فشار جزئی ماده‌ی چگالش شونده بیش‌تر از فشاربخار آن در همان دما باشد. تشکیل برفک در طول عملیات چگالش پدیده‌ای نامطلوب است و موجب هدر رفت محصول می‌شود [۹].

۱.۲ سطح فوق اشباع گازدر کندانسور

از جمله شرایط لازم برای تشکیل برفک درون کندانسور آن است که سطح فوق‌اشباع گاز درون کندانسور بیش‌تر از مقدار بحرانی آن باشد. در این حالت هسته‌های جامد درون گاز شروع به تشکیل می‌کنند [۲]. سطح فوق-اشباع برای گاز در حال چگالش به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۱۰]:

$$S = \frac{P_A}{P_{As(T)}} \quad (1)$$

P_A فشار جزیی ماده در گاز و $P_{As(T)}$ فشار بخار ماده روی سطح در دمای معین می‌باشد. سطح فوق اشباع بحرانی برای چگالش یک گاز از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۱۱].

$$\log s_{cr} = \sqrt{\frac{1.44}{\log(K)} \frac{M}{\rho}} \left(\frac{\sigma}{T}\right)^{1.5} \quad (2)$$

$$K = \frac{\gamma}{\rho} \frac{2m\sigma}{\pi} (p/kT)^2 \quad (3)$$

که در این روابط M جرم مولکولی (g/mol)، σ کشش سطحی (J/cm^2)، ρ چگالی (kg/m^3)، T دمای سیستم (K)، γ ضریب چگالش، m جرم مولکول بخار در معرض چگالش (kg)، p فشار (Pa) و k ثابت بولتزمن (J/K) می‌باشد. مقدار γ برای چگالش UF_6 عددی بین صفر و یک می‌باشد و برای سیستم شامل اورانیوم هگزافلوراید $0/8$ در نظر گرفته شده است [۱۱].

برای به دست آوردن کشش سطحی از رابطه‌ی زیر استفاده شد [۱۱].

$$\sigma = \frac{\Delta H - RT}{v} \left(\frac{\Delta n}{n}\right) h \quad (4)$$

در این رابطه σ کشش سطحی (J/cm^2)، ΔH آنتالپی تبخیر (kJ/mol)، R ثابت جهانی گازها ($J/mol.K$)، Δn ضریب مولکولی (وابسته به ساختار سطح لایه‌ی تشکیل شونده)، h ضخامت یک لایه‌ی مولکولی از ماده چگالش یافته (m)، v حجم مولی (cm^3/mol) و n عدد کئوردیناسیون می‌باشد. پارامترهای مورد نیاز برای روابط ۲-۴ در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱). مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای روابط تشکیل برفک

پارامتر	واحد	مقدار
R (ثابت جهانی گازها)	J/(mole.K)	۸/۳۱۴
K (ثابت بولتزمن)	J/K	$۱/۳۸ \times ۱۰^{-۲۳}$
M (جرم مولکولی)	g/mol	۳۵۰
m (جرم یک مولکول)	g	$۵/۸۱۴ \times ۱۰^{-۲۲}$
n (عدد کنوردانسیون اتم اورانیوم)	-	۶
Δn (ضریب مولکولی)	-	۱
h (ضخامت یک لایه‌ی مولکولی از UF_6)	nm	۰/۱۹۹۶
γ (ضریب چگالش)	-	۰/۸

برفک‌ها در هر مکانی از کندانسور که سطح فوق اشباع بیش‌تر از حالت بحرانی آن باشد امکان تشکیل دارند. غلظت جرمی برفک تشکیل شده در شرایط عملیاتی کندانسور از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۱]:

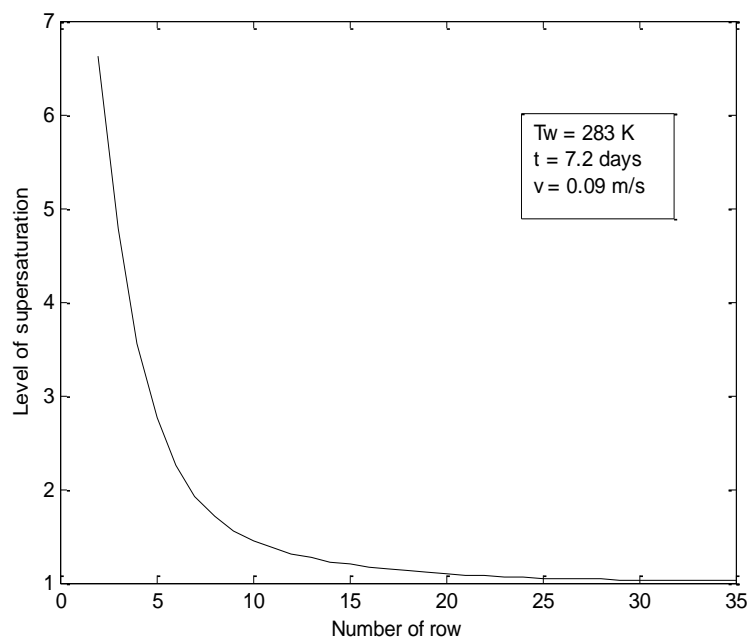
$$G = \frac{MP}{RT} (S-1) \quad (۵)$$

در رابطه بالا G غلظت جرمی برفک تشکیل شده (g/cm^3)، M جرم مولکولی (g/mol)، P فشار سیستم (Pa)، T دمای سیستم (K)، R ثابت جهانی گازها ($J/mole K$) و S سطح اشباع گاز درون کندانسور می‌باشد. با استفاده از رابطه بالایی توان مقدار برفک تشکیل شده درون هر حجم کنترل را و نهایتاً مقدار کل برفک تشکیل شده در طول فرایند را محاسبه نمود.

۲.۲. درصد فوق اشباع گاز در حال چگالش در طول کندانسور

شکل (۲) روند تغییرات درصد فوق اشباع گاز را بر حسب تعداد ردیف‌های لوله در کندانسور نشان می‌دهد. همانطور که از این نمودار مشخص است، بالاترین مقدار برای درصد فوق اشباع در اوایل کندانسور اتفاق می‌افتد.

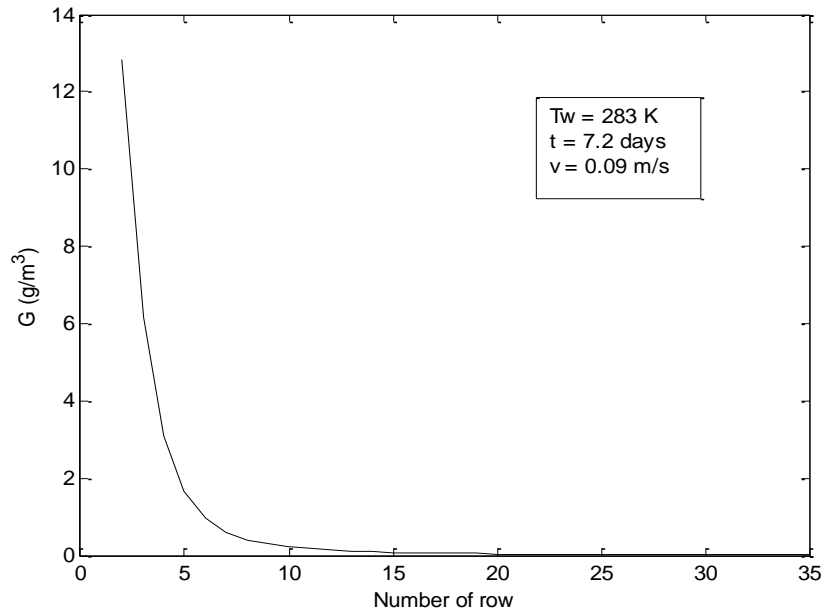
در ناحیه‌ی شش ردیف اولیه‌ی لوله‌ها روند کاهشی میزان برفک تولیدی با شیب بسیار تندی مشاهده می‌شود که متعاقباً پس از این ناحیه تغییرات روند ملایم‌تر و در نهایت تقریباً ثابتی را پیدا می‌کند. هرچه مقدار فوق اشباعیت از مقدار بحرانی آن (در شرایط کندانسور تقریباً برابر ۱ می باشد) بیش تر شود، احتمال تشکیل ذرات برفک درون کندانسور افزایش می‌یابد.



شکل (۲). تغییرات درصد فوق اشباع گاز بر حسب طول کندانسور

۳.۲. غلظت برفک در طول کندانسور

در شکل (۳) می‌توان غلظت برفک را در طول کندانسور برحسب تعداد ردیف‌های لوله مشاهده نمود. همین‌طور که از این نمودار مشخص است، بیشترین غلظت برفک در قسمت‌های ابتدایی کندانسور تشکیل می‌شود. نتایج حاصله در دو شکل (۲) و (۳) با یکدیگر مطابقت دارد.

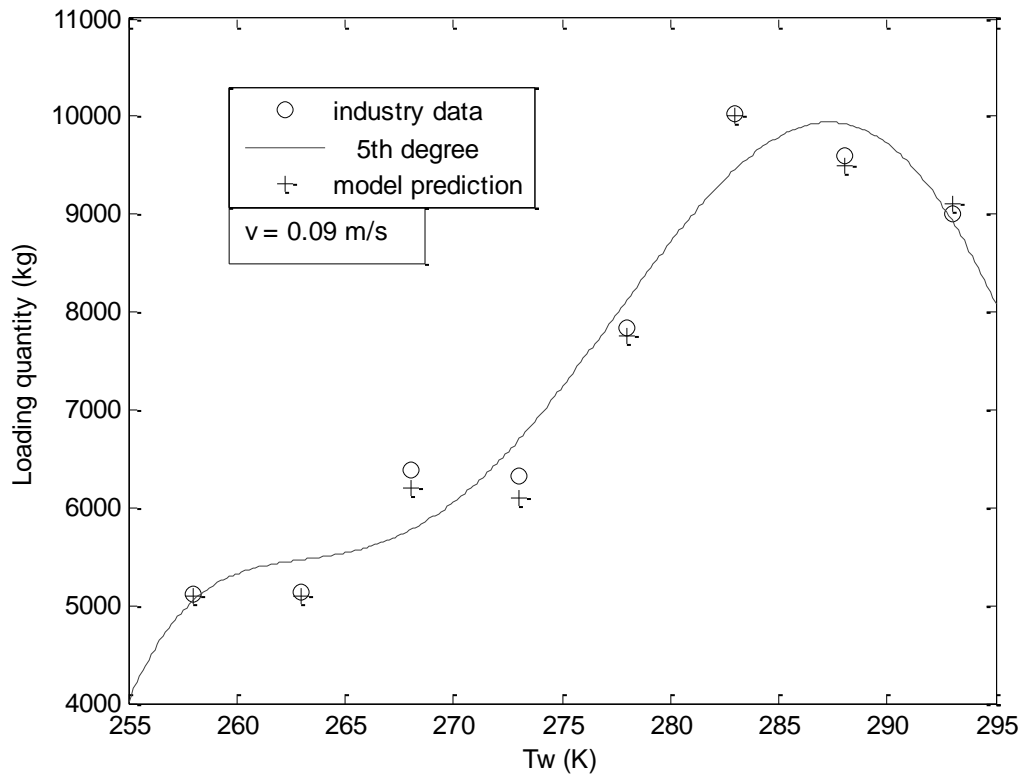


شکل (۳). تغییرات غلظت برفک در طول کندانسور

۴.۲. تاثیر دمای مایع خنک کننده ورودی بر مقدار کلی چگالش یافته UF_6 درون کندانسور

در شکل (۴) اثر دمای مایع خنک کننده ورودی بر روی مقدار کلی ماده ته‌نشین شده UF_6 درون کندانسور بررسی شده است. مقدار کلی UF_6 چگالش یافته درون کندانسور با استفاده از مدل بدست می‌آید. بدان صورت که در محاسبات مدل با استفاده از روش حدس و خطا ابتدا دمای هر حجم کنترل بدست می‌آید و سپس با استفاده از حرارت منتقل شده، مقدار چگالش UF_6 درون هر حجم کنترل محاسبه می‌شود. در نهایت نیز از جمع این مقادیر، مقدار کلی UF_6 چگالش یافته درون کندانسور در طول فرآیند بدست می‌آید.

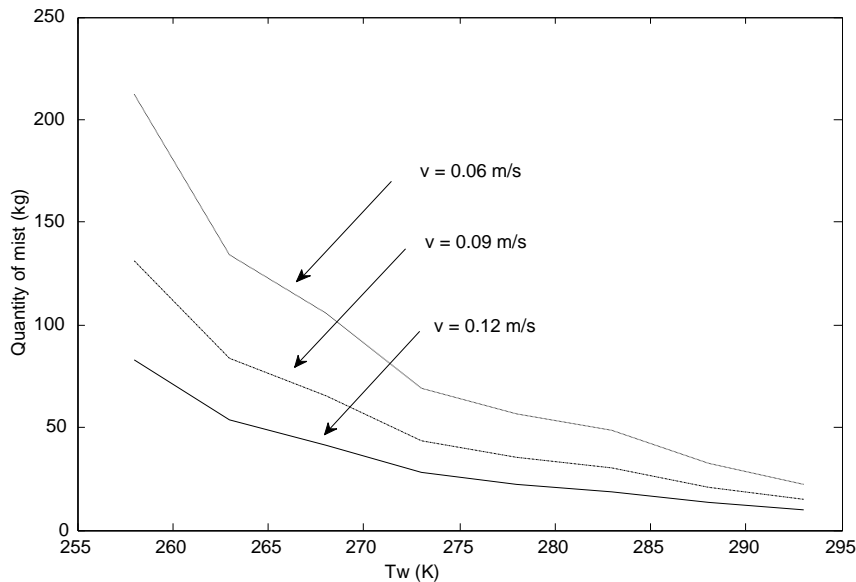
دلیل روند ملاحظه شده این است که در ابتدا با افزایش دمای مایع خنک کننده ورودی به کندانسور، مقدار برفک تولید شده کاهش می‌یابد که این عامل سبب افزایش جرم UF_6 ته‌نشین شده در داخل کندانسور می‌گردد. ولی در دماهای بالاتر هر چند مقدار برفک خروجی کاهش می‌یابد، اما به دلیل دمای بالای سطح لوله های کندانسور، مقدار چگالش درون کندانسور کاهش پیدا می‌کند.



شکل (۴). تاثیر دمای مایع خنک کننده ورودی بر مقدار کلی چگالش UF_6 درون کندانسور ۱

۵.۲. اثر سرعت گاز ورودی بر مقدار برفک خروجی از کندانسور

در شکل (۵) اثر سرعت گاز ورودی و دمای مایع خنک کننده بر مقدار برفک خروجی از کندانسور را نشان می‌دهد. این نمودار برای دمای مایع خنک کننده ورودی ۲۷۸ کلوین و در سه سرعت ۰/۰۶، ۰/۰۹ و ۰/۱۲ متر بر ثانیه برای گاز ورودی حاصل شده است. لازم به ذکر است که مخلوط گاز- بخار ورودی به کندانسور ۱، متشکل از چهار ترکیب با درصد جرمی (UF_6 (۴۰/۳۹ %)، N_2 (۵۱/۲ %)، O_2 (۴/۷۴ %) و HF (۳/۶۷ %) می‌باشد. با توجه به نمودار، با افزایش سرعت گاز ورودی، مقدار برفک خروجی از کندانسور کاهش می‌یابد.



شکل (۵). بررسی تاثیر سرعت گاز و دمای مایع خنک کننده بر مقدار برفک خروجی از کندانسور ۱

۳. شرایط عملیاتی بهینه

با توجه به نمودارهای ارائه شده، دمای ۲۸۳ کلوین، دمای بهینه برای مایع خنک کننده ورودی محسوب می شود. این دما تنها دمایی است که در آن بیشترین مقدار چگالش و در عین حال کمترین مقدار برفک خروجی از کندانسور حاصل می شود. همچنین در این دما بازده کندانسور در حد مطلوب ۹۳ می باشد. بازده کندانسور از تقسیم مقدار چگالش یافته UF_6 درون کندانسور به مقدار کل UF_6 ورودی بدست می آید. از تحلیل و بررسی بر روی نتایج و نمودارها مشخص می شود سرعت بهینه معادل ۰/۰۹ متر بر ثانیه است. از نمودارها واضح است که هرچه سرعت بیشتر از این مقدار انتخاب شود، هرچند برفک خروجی از کندانسور کاهش و مقدار بارگیری افزایش می یابد، ولی در این حالت مواد به صورت ناهمگن درون کندانسور چگالش می یابند [۸].

۴. نتیجه گیری

این تحقیق به منظور بهبود مدلسازی کندانسورهای واحد جداسازی UF_6 جهت پیش بینی شرایط تشکیل برفک در طول کندانسورهای واحد انجام گردیده است. در نهایت از مدل تدوین شده، در راستای به دست آوردن مقادیر برفک استفاده گردید. سرعت بهینه گاز ورودی برابر ۰/۰۹ متر بر ثانیه و دمای بهینه آب خنک کننده ورودی ۱۰

درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در این شرایط بهینه بازده کندانسور ۹۳ درصد، جرم چگالش یافته UF_6 برابر 10023kg و مقدار برفک خروجی از آن 42kg در مدت $7/2$ روز می‌باشد.

قدردانی

بدین وسیله از حمایت‌های معنوی و مالی شرکت سوخت راکتورهای هسته‌ای در این تحقیق در قالب قرارداد طرح تحقیقاتی شماره ۹۱/۲۱۵۵/۱۹۸۷۱ و همچنین دانشگاه صنعتی اصفهان تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

1. H. Grin, V. Lein, Aerosols-dusts, smokes and fogs, Leningrad, Moscow: Khimia (1969)
2. P.A. Smolkin, A.S. Buynovskiy, V.V. Lazarchuk, A.A. Matveev, V.L. Sofronov, Mathematical model of desublimation process of volatile metal fluorides, Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 310 (2006) 69-71.
3. V.L. Sofronov, A.S. Buinovskiy, K.F. Vasiliev, on sublimation purification of titanium tetra-fluoride, Moscow: Nauka (1984).
4. D. Seker, H. Karatas, N. Egrican, Frost formation on fin-and-tube heat exchangers, Int. J. of Refrigeration, 27(2003) 375-377.
5. K. Lenic, A. Trp, B. Frankovic, Unsteady heat and mass transfer during frost formation in a fin-and-tube heat exchanger, Int. J. of Refrigeration, 27(2011) 367-374.
6. J. Cui, W. Z. Li, Y. Liu, Y. S. Zhao, A new model for predicting performance of fin-and-tube heat exchanger under frost condition, Int. J. Heat and Fluid Flow, 32(2010) 249-260.
7. P. J. Mago, S. A. Sherif, Heat and mass transfer on a cylinder surface in cross flow under supersaturated frosting conditions, Int. J. refrigeration, 26 (2003) 889-899.
8. H. Share Mohammadi, S. M. Ghoreishi, F. Mohammadi, 22th Iranian Nuclear Conference, 2016.
9. A. Claire, S. Howard, Purification by Sublimation, New Jersey (2006).
10. A. G. Amelin, Theoretical basis of fog formation at vapor condensation, Moscow: Khimia (1972).
11. P. A. Smolkin, A. S. Buynovsky, V. L. Sofronov, Determining the optimal process conditions for volatile metal fluoride desublimation, Chemistry for Sustainable Development, 19(2011) 417-421.