



جداسازی ایزوتوپ زنون ۱۲۴ با استفاده از زنجیره غیر متداول مربعی در حالت تک

خروجی

ایمانی، مرتضی^۱ - کشتکار، علیرضا^{۱*} - رشیدی، عباس^۲ - صفدری، سید جابر^۱ - کریمی ثابت، جواد^۱

- ملاح، محمد حسن^۱ - نوروژی، علی^۳

۱: سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده مواد و سوخت هسته‌ای، تهران - ایران

۲: دانشگاه مازندران، دانشکده مهندسی، بابلسر - ایران

۳: سازمان انرژی اتمی، شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران، تهران - ایران

چکیده: جداسازی ایزوتوپ های پایدار به منظور استفاده در پزشکی و سایر علوم مورد توجه می باشد. در این مقاله جداسازی ایزوتوپ زنون ۱۲۴ که جهت تولید رادیو ایزوتوپ ید ۱۲۳ کاربرد دارد، توسط زنجیره غیر متداول تک خروجی ارائه شده است. برای شبیه سازی زنجیره معادلات بقای جرم در حالت گذرا ارائه می شوند. با شبیه سازی زنجیره مربعی تک خروجی با ۱۰ مرحله و فاکتور جداسازی کلی ۱/۲ مشاهده می شود برای تولید ۱ گرم ایزوتوپ زنون ۱۲۴ تا غنای ۹۰ درصد نیاز به یک بار استفاده از زنجیره تک خروجی و ۵۰۰ ساعت گاز دهی با نرخ خوراک ۲۰ گرم بر ساعت می باشد.

واژه های کلیدی: زنجیره غیر متداول، ایزوتوپ زنون ۱۲۴، حالت گذرا، زمان تعادل، سیستم های چند جزئی

Separation of ^{124}Xe isotope using nonconventional square cascade in single withdrawal condition

Imani, Morteza¹; Keshtkar, Alireza^{1*}; Rashidi, Abbas²; Safdari, Seyed jabber¹; Karimi Sabet, Javad¹; Malah, Mohammad hasan¹; Nourozi, Ali³

1: Atomic Energy Organization, Nuclear Science and Technology Research institute, Nuclear Materials and Fuel Research School, Tehran - Iran

2: University of Mazandaran, Faculty of Engineering and Technology, Babolsar - Iran

3: Atomic Energy Organization, Advanced Technology Company of Iran, Tehran - Iran

Abstract: The separation of stable isotope is important for use in medicine and other sciences. In this paper, the isotope separation of ^{124}Xe to generate ^{123}I radioisotope, is presented by the nonconventional single withdrawal cascades. To simulate the cascade, the mass conservation equations have been presented in transient condition. By simulating a single withdrawal square cascade with 10 stages and 1.2 overall separation

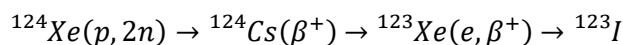


factor, it is observed that to produce 1 gr of ^{124}Xe isotope up to 90% enrichment, there is a need for one-time use of the single withdrawal cascade and 500-hour gas supply at a rate of 20 gr/hr.

Keywords: Nonconventional cascade, ^{124}Xe , Transient condition, Equilibrium time, Multi component systems

مقدمه:

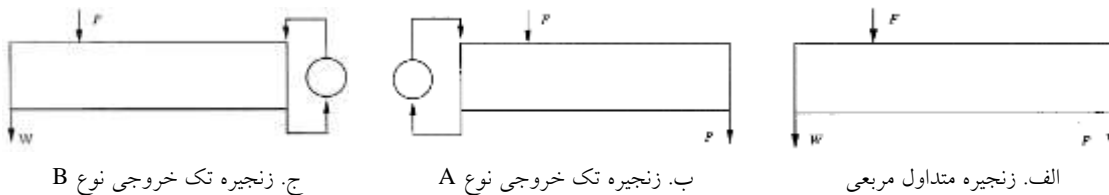
جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار به منظور استفاده در پزشکی، صنایع و کشاورزی مورد اهمیت می‌باشد، که جداسازی ایزوتوپی عناصر چند جزئی به تازگی در کشور مورد توجه قرار گرفته است. جداسازی ایزوتوپی عناصر در زنجیره‌هایی از ماشین‌های جداساز صورت می‌پذیرد که پرکاربردترین این زنجیره‌ها، زنجیره‌های غنی‌سازی با استفاده از ماشین سانتریفیوژ گازی می‌باشد. این زنجیره‌ها بصورت متداول شامل یک جریان ورودی و دو جریان خروجی (یک جریان محصول و یک جریان پسماند) بوده و در شرایط پایا کار می‌کنند. به منظور جداسازی ایزوتوپ هدف در مخلوط چند جزئی با غنای پایین در خوراک طبیعی با استفاده از زنجیره‌های متداول نیاز به استفاده چندین زنجیره بصورت متوالی می‌باشد تا غلظت مورد نیاز از ایزوتوپ هدف حاصل شود. استفاده از زنجیره‌های متداول در این شرایط، نیازمند هزینه ساخت چندین زنجیره و تامین خوراک برای این زنجیره‌ها می‌باشد. با توجه به وجود این مشکلات و هزینه‌ها در سال ۲۰۰۲ زنجیره‌های غیر متداول ارائه شدند [۱]. که با توجه به هدف جداسازی به دو دسته تک خروجی و تک خروجی بدون جریان خوراک تقسیم‌بندی می‌شوند. زنجیره‌های تک خروجی برای جداسازی ایزوتوپ‌های سبک و سنگین بکار می‌روند و زنجیره‌های تک خروجی بدون جریان خوراک عمدتاً برای جداسازی ایزوتوپ‌های میانی بکار می‌روند. در این مقاله هدف جداسازی ایزوتوپ زنون ۱۲۴ می‌باشد. عنصر زنون شامل ۹ ایزوتوپ بوده و سبک‌ترین ایزوتوپ آن زنون ۱۲۴ می‌باشد. بنابراین با توجه به مطالب ذکر شده از زنجیره غیر متداول تک خروجی برای جداسازی ایزوتوپ زنون ۱۲۴ در این مقاله استفاده می‌شود. مهم‌ترین کاربرد ایزوتوپ زنون ۱۲۴ تولید رادیو ایزوتوپ ید ۱۲۳ می‌باشد که این رادیو ایزوتوپ در پزشکی کاربرد دارد. ایزوتوپ زنون ۱۲۴ طبق واکنش زیر به رادیو ایزوتوپ ید ۱۲۳ تبدیل می‌شود.





با حل معادلات بقا در حالت گذرا شبیه‌سازی زنجیره‌های غیر متداول انجام شده و نتایج برای تولید ۱ گرم زنون ۱۲۴ با غنای ۹۰ درصد ارائه می‌گردد.

مواد و روش کار: زنجیره‌های گذاری تک خروجی عمدتاً ساختار مربعی دارند. در این زنجیره‌ها بر حسب اینکه هدف جداسازی ایزوتوپ‌های سبک و یا ایزوتوپ‌های سنگین باشد، یکی از جریان‌های خروجی زنجیره قطع می‌شود. به عنوان مثال در شکل ۱ در زنجیره‌های تک خروجی نوع A با توجه به قطع جریان پسماند و قرارگیری مخزن در این سمت، ایزوتوپ‌های سنگین در این زنجیره در مخزن جمع‌آوری می‌شوند. در زنجیره‌های تک خروجی نوع B با توجه به قطع جریان محصول و قرارگیری مخزن در سمت محصول زنجیره ایزوتوپ‌های سبک در مخزن جمع‌آوری می‌شوند.



ج. زنجیره تک خروجی نوع B

ب. زنجیره تک خروجی نوع A

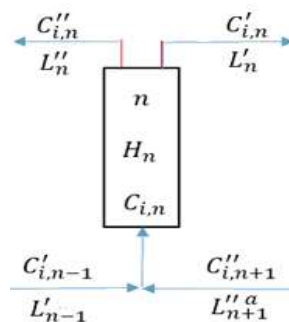
الف. زنجیره متداول مربعی

شکل ۱: مقایسه شماتیک زنجیره‌های متداول مربعی و زنجیره‌های غیر متداول تک خروجی

برای شبیه‌سازی زنجیره‌های تک خروجی، جریان‌ها در طول زنجیره در حالت پایا در نظر گرفته می‌شود

و با توجه به اینکه یک جریان ورودی و یک جریان خروجی از زنجیره وجود دارد غلظت‌ها در طول

زنجیره با گذشت زمان تغییر کرده و پس از گذشت یک مدت زمان طولانی به حالت پایا می‌رسند.



شکل ۲: نمایش جریان‌های ورودی و خروجی به مراحل

برای محاسبه غلظت‌ها، قانون بقای جرم در حالت گذرا بصورت زیر نوشته می‌شود [۲،۳].



$$\frac{\partial H_n \hat{C}_{i,n}}{\partial t} = L''_{n+1} C''_{i,n+1} + L'_{n-1} C'_{i,n-1} - (L''_n) C''_{i,n} - (L'_n) C'_{i,n} \quad (1)$$

در معادله (۱) H_n موجودی گاز مرحله ، $\hat{C}_{i,n}$ متوسط غلظت گاز عبوری از مرحله، $C'_{i,n}$ غلظت

ایزوتوپ‌ها در جریان غنی شده، $C''_{i,n}$ غلظت ایزوتوپ‌ها در جریان تهی شده، L''_n نرخ جریان تهی شده و L'_n

نرخ جریان غنی شده خروجی از مرحله شماره n می‌باشد. پس از گسسته سازی معادله (۱) به روش کرنک

نیکلسون و استفاده از رابطه فاکتور جداسازی معادله زیر حاصل می‌شود [۴].

$$\begin{aligned} & -\frac{L'_{n-1}{}^a C'_{i,n-1}{}^{a(m+1)}}{2} + \left(\frac{H_n}{\Delta t} \frac{L'_n + P_n}{L''_n + W_n + L'_n + P_n} + \frac{L'_n + P_n}{2} \right) C'_{i,n}{}^{(m+1)} \\ & + \left(\frac{H_n}{\Delta t} \frac{L''_n + W_n}{L''_n + W_n + L'_n + P_n} + \frac{L''_n + W_n}{2} \right) C''_{i,n}{}^{(m+1)} - \frac{L''_{n+1}{}^a C''_{i,n+1}{}^{a(m+1)}}{2} \\ & = \frac{L'_{n-1}{}^a C'_{i,n-1}{}^{a(m)}}{2} + \left(\frac{H_n}{\Delta t} \frac{L'_n + P_n}{L''_n + W_n + L'_n + P_n} - \frac{L'_n + P_n}{2} \right) C'_{i,n}{}^{(m)} \\ & + \left(\frac{H_n}{\Delta t} \frac{L''_n + W_n}{L''_n + W_n + L'_n + P_n} - \frac{L''_n + W_n}{2} \right) C''_{i,n}{}^{(m)} + \frac{L''_{n+1}{}^a C''_{i,n+1}{}^{a(m)}}{2} + F_c C_{i,n}^F \end{aligned} \quad (2)$$

در رابطه (۲) بالانویس m نشان‌دهنده‌ی بازه زمانی می‌باشد. برای محاسبه غلظت مراحل می‌بایست

رابطه (۲) را برای هر بازه زمانی حل نمود. در این رابطه با استفاده از روش تکرار q می‌توان غلظت جریان

غنی شده را بر حسب غلظت جریان تهی شده جایگذاری نمود و رابطه خطی بدست آمده را در یک دستگاه

معادلات خطی حل کرد. فرآیند ذکر شده در هر بازه زمانی برای شبیه‌سازی در حالت گذرا تکرار می‌شود.

نتایج: برای جداسازی ایزوتوپ زنون ۱۲۴ که سبک‌ترین ایزوتوپ از ۹ ایزوتوپ پایدار عنصر زنون می‌باشد، یک

زنجیره تک خروجی نوع B با مشخصات موجود در جدول ۱ در نظر گرفته می‌شود. گاز زنونی که به عنوان خوراک

زنجیره در نظر گرفته شده است دارای غلظت طبیعی می‌باشد که غلظت طبیعی ایزوتوپ‌ها در جدول ۲ ذکر شده

است. در شکل ۳ ساختار این زنجیره و مقادیر جریان‌های بین مراحل این زنجیره نمایش داده شده است.

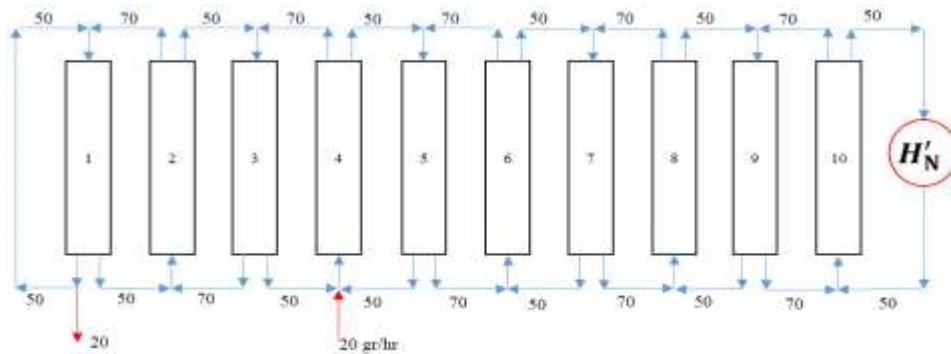


جدول ۱: مشخصات زنجیره تک خروجی

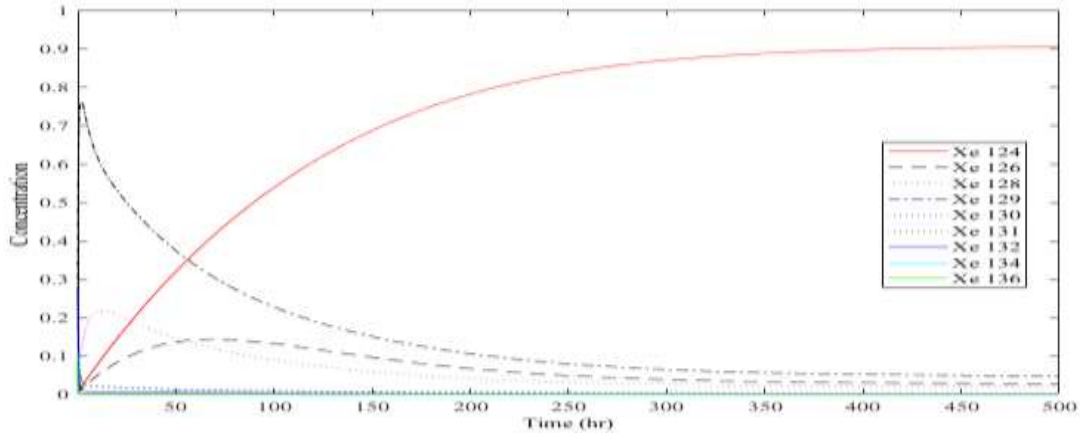
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
4	مرحله ورود خوراک	1.2 gr	$H_{n=1,\dots,N}$	10	N
12	تعداد ماشین مراحل	0.05 gr	$H''_{n=1,\dots,N}$	1.2	α_0
120	تعداد کل ماشین	0.05 gr	$H'_{n=1,\dots,N-1}$	20 gr/hr	F_4
0	ضریب برش زنجیره	1 gr	H'_N	20 gr/hr	W_1
6	نسبت خوراک ورودی به مرحله به خوراک زنجیره (G/F)	0.1 gr	موجودی گاز ماشین	10 gr/hr	نرخ دبی خوراک بهینه به ماشین

جدول ۲: غلظت خوراک طبیعی گاز زنون

Xe 124	Xe 126	Xe 128	Xe 129	Xe 130	Xe 131	Xe 132	Xe 134	Xe 136
9.3E-4	9.0E-4	1.917E-2	2.644E-1	4.08E-2	2.11E-1	2.689E-1	1.044E-1	8.87E-2



شکل ۳: شماتیک زنجیره و نمایش جریان های بین مراحل (واحد مقادیر جریان گرم بر ساعت می باشد) در شکل ۴ غلظت مخزن بر حسب زمان ترسیم شده است همانطور که مشاهده می شود غلظت ایزوتوپ سبک ۱۲۴ به مرور زمان افزایش می یابد و پس از گذشت ۵۰۰ ساعت به مقدار ۹۰ درصد می رسد. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود غلظت ایزوتوپ های سنگین در مخزن با گذشت زمان کاهش می یابد و ایزوتوپ های میانی در ابتدا با توجه به کم بودن غلظت ایزوتوپ های سبک در مخزن جمع آوری می شوند و افزایش غلظت برای این ایزوتوپ ها رخ خواهد داد، به عنوان مثال ایزوتوپ زنون ۱۲۸ و زنون ۱۲۹ در یک زمان خاص به مقدار بیشینه خود در مخزن می رسند و سپس از مخزن خارج می شوند و به مرور غلظت آنها کاهش می یابد. در ساعت ۸، غلظت ایزوتوپ زنون ۱۲۸ در مخزن بیشینه خواهد بود و در ساعت ۳ غلظت ایزوتوپ زنون ۱۲۹ بیشینه خواهد بود.

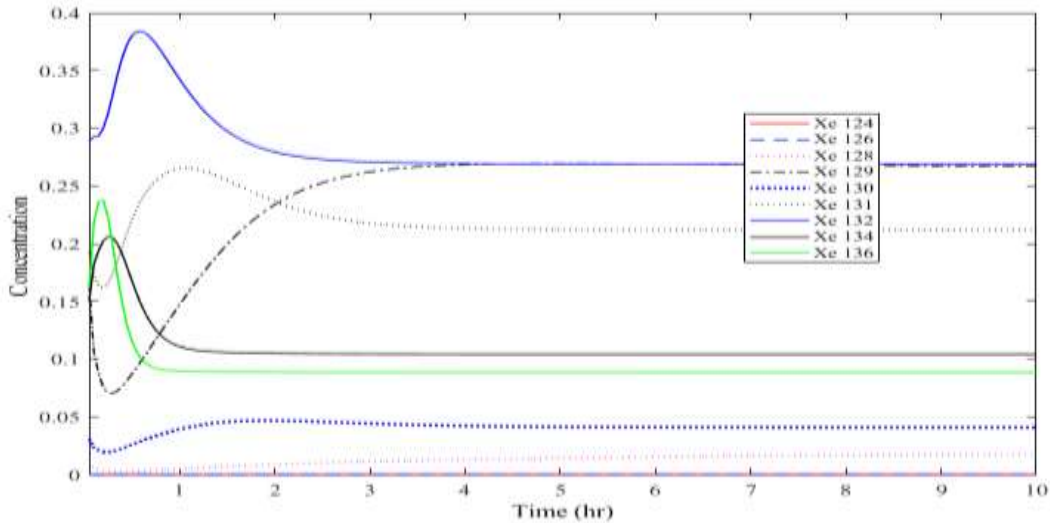


شکل ۴: غلظت ایزوتوپ‌ها در مخزن بر حسب زمان

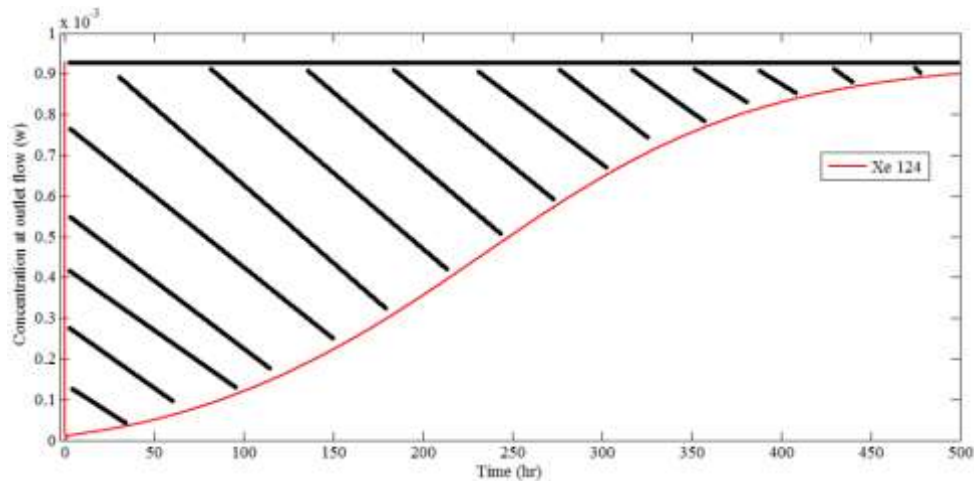
جدول ۳: غلظت ایزوتوپ‌های زنون در مخزن در ساعت ۵۰۰

Xe 124	Xe 126	Xe 128	Xe 129	Xe 130	Xe 131	Xe 132	Xe 134	Xe 136
0.9048	0.0266	0.0181	0.0471	0.0014	0.0016	0.0004	9.25E-6	5.00E-7

در شکل ۵ غلظت ایزوتوپ‌ها در ۱۰ ساعت اول در جریان خروجی زنجیره نمایش داده شده است، به علت آنکه تغییرات غلظت ایزوتوپ زنون ۱۲۴ در جریان خروجی در این شکل قابل رویت نمی‌باشد در شکل ۶ تنها غلظت ایزوتوپ زنون ۱۲۴ بر حسب زمان نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با گذشت زمان و به اشباع رسیدن غلظت ایزوتوپ زنون ۱۲۴ در مخزن، غلظت جریان خروجی به غلظت جریان خوراک ورودی نزدیک خواهد شد و پس از گذشت یک زمان طولانی و رسیدن به حالت پایا مقدار غلظت جریان خروجی برابر غلظت جریان خوراک ورودی خواهد شد.



شکل ۵: غلظت جریان خروجی زنجیره (پسماند) بر حسب زمان



شکل ۶: غلظت ایزوتوپ زنون ۱۲۴ در جریان خروجی زنجیره و نمایش ناحیه تجمع جرم در زنجیره در شکل ۶ ناحیه هاشور خورده اختلاف غلظت جریان خروجی با غلظت جریان خوراک ورودی را نمایش می‌دهد. مساحت سطح هاشور خورده نشان‌دهنده جرم تجمع یافته از ایزوتوپ زنون ۱۲۴ در طول مراحل زنجیره و مخزن می‌باشد. با توجه به اینکه در طول ۵۰۰ ساعت کار زنجیره، غلظت جریان خروجی از زنجیره بر حسب زمان تغییر می‌کند اگر این جریان در طول این مدت در یک مخزن جمع‌آوری شود متوسط غلظت جریان خروجی از زنجیره مطابق جدول ۴ خواهد بود.



جدول ۴: متوسط غلظت ایزوتوپ‌ها در جریان خروجی جمع اوری شده در طی ۵۰۰ ساعت

Xe 124	Xe 126	Xe 128	Xe 129	Xe 130	Xe 131	Xe 132	Xe 134	Xe 136
0.0009	0.0009	0.0192	0.2644	0.0408	0.2118	0.2689	0.1044	0.0887

با مشاهده شکل ۴ می‌توان نتیجه گرفت در ساعات ابتدایی جداسازی زنجیره با توجه به اینکه غلظت ایزوتوپ سبک در مخزن پایین می‌باشد. جداسازی ایزوتوپ سبک سریع‌تر صورت گرفته و شیب افزایش غلظت ایزوتوپ سبک زیاد می‌باشد. با گذشت زمان و به اشباع رسیدن مخزن از ایزوتوپ سبک به تدریج شیب افزایش غلظت ایزوتوپ سبک در مخزن کاهش می‌یابد تا به حالت پایدار خود برسد بنابراین در لحظات ابتدایی به عنوان مثال در ۱۵۰ ساعت اول غلظت ایزوتوپ اول ۶۰ درصد افزایش پیدا می‌کند ولی در ۳۵۰ ساعت دوم تنها ۳۰ درصد غلظت ایزوتوپ زنون ۱۲۴ افزایش می‌یابد از همین رو میزان ادامه دادن به فرایند جداسازی نیازمند بهینه سازی می‌باشد.

بحث و نتیجه گیری: در این مقاله برای جداسازی ایزوتوپ زنون ۱۲۴ که غلظت آن در خوراک طبیعی

بسیار پایین می‌باشد از زنجیره غیر متداول تک خروجی استفاده گردید. معادلات توزیع غلظت برای شبیه سازی این زنجیره‌ها بیان شده و شبیه سازی یک زنجیره با ۱۰ مرحله صورت گرفت. با استفاده از این شبیه سازی مشاهده می‌شود برای تولید ۱ گرم ایزوتوپ زنون ۱۲۴ تا غنای ۹۰ درصد نیاز به یک بار استفاده از زنجیره تک خروجی و ۵۰۰ ساعت گاز دهی با نرخ خوراک ۲۰ گرم بر ساعت می‌باشد.

مراجع:

- [1] Zeng, S.; Ying, C. "Separating isotope components of small abundance". *Sep. Sci. Technol.* 2002, 37 (15), 3577–3598.
- [2] Zeng, S.; Ying, C. "A robust and efficient calculation procedure for determining concentration distribution of multicomponent mixture". *Sep. Sci. Technol.* 2000, 35 (4), 613–622.
- [3] Zeng, S.; Ying, C. "A second-order time-accurate method for determining the distribution of concentration distribution of multicomponent mixtures in separation cascades". *Sep. Sci. Technol.* 2000, 35 (5), 729–741.
- [4] Zeng, S.; Ying, C. "Transient process in gas centrifuge cascades for separation of multicomponent isotope mixtures". *Sep. Sci. Technol.* 2001, 36 (15), 3439–3457.