



شبیه‌سازی عددی تأثیر سرعت دیواره بر جریان گاز درون یک سانتریفیوژ گازی

غضنفری، ولی‌اله^(۱) - صالحی، علی اکبر^(۲) - کشتکار، علیرضا^(۱) - صفدری، سید جابر^(۱) - شادمان، محمد مهدی^(۳) - عسکری، محمدحسین^(۳) - امینی، الهام^(۳)

(۱) سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده چرخه سوخت

(۲) دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی

(۳) شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران

چکیده:

عملکرد یک سانتریفیوژ گازی به شدت به میدان جریان گاز درون آن وابسته است. بدین منظور، جریان گاز درون روتور با استفاده از روش عددی حجم محدود برای حالت برگشت کامل جریان (بدون ورود و خروج جریان) با استفاده از نرم افزار این فوم شبیه‌سازی می‌گردد. برای بررسی صحت شبیه‌سازی، مقادیر شار جرمی محوری بدست آمده از نرم‌افزار این فوم با نتایج حاصل از فلونت مقایسه گردیده است که حاکی از دقت قابل قبول شبیه‌سازی حاضر می‌باشد. با بررسی نتایج مشخص گردید با افزایش سرعت دیواره روتور، جرم بیشتری از گاز کنار دیواره جمع می‌گردد و ناحیه مرکزی رقیق‌تر می‌گردد. با رقیق شدن این ناحیه فرض پیوستگی در آن بدون اعتبار گشته و جریان باید در سطح مولکولی بررسی گردد.

کلید واژه‌ها: سانتریفیوژ گازی، سرعت دیواره، عدد نادسن، شبیه‌سازی عددی

Numerical simulation of wall velocity effect on gas flow in a gas centrifuge

Ghazanfari, Valiyollah^۱; Salehi, Aliakbar^۲; Keshtkar, Alireza^۱; Safdari, Seyed Jaber^۱; Shadman, Mohammad Mehdi^۳; Askari, Mohammad Hosein^۳; Amini, Elham^۳

1. Materials and Nuclear Fuel Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box:11365-8486, Tehran-Iran

2. Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, P.O.Box: 14565-1114, Tehran-Iran

3. Advanced Technology Company of Iran, AEOL, P.O.Box: 14399-55431, Tehran-Iran

Abstract:

The performance of a gas centrifuge depends strongly on the gas flow field. For this purpose, the gas flow in the rotor is simulated by using a numerical method based on finite volume for total reflux thermal-drive by using OpenFoam. To verify the accuracy of simulation, the value of axial mass flux obtained with OpenFoam have been compared with the result of Fluent, which indicates the accuracy of present simulation. It was revealed that by increasing the wall velocity, more masses are collected next to the wall and central region becomes rarified. While in rarified regions, where continuum hypothesis becomes invalid, gas flows should be described on molecular level.

Keywords: Gas centrifuge, Wall velocity, Knudsen number, Numerical simulation



مقدمه:

ماشین سانتریفیوژ، استوانه دواری است که با ایجاد نیروی گریز از مرکز باعث جدایش ایزوتوپ‌های مختلف یک گاز می‌گردد. تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز شدید ناشی از دوران روتور جزء سنگین‌تر در نزدیک دیواره و جزء سبک‌تر در فاصله‌ای دورتر از دیواره و نزدیک‌تر به محور قرار می‌گیرد [1]. همچنین به منظور افزایش ضریب جداسازی، نیاز به ایجاد حرکت محوری و جدایش محوری هم وجود دارد. حرکت محوری گاز از طریق عوامل محرکی مانند گرادیان دمای دیواره، اختلاف دمای کپ‌ها، حضور اسکوپ و ورود خوراک، باعث ایجاد جدایش محوری می‌گردد. با توجه به موارد ذکر شده، مطالعات انجام گرفته با شیوه‌های گوناگونی به تحلیل جریان گاز درون روتور سانتریفیوژ پرداخته‌اند که می‌توان به حل روتور بلند [2] و حل لایه مرزی (اونساگر) (Olander, 1981; Brouwers, 1978; Migliorini, 2013) اشاره کرد؛ لازم به توضیح است روش‌های مذکور با فرضیات و ساده-سازی‌های گوناگون به صورت تحلیلی حل شده‌اند. امروزه با ارتقاء رایانه‌ها از لحاظ سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، روش‌های عددی مورد توجه قرار گرفته‌اند (JIANG & Zeng, 2006; Bogovalov, kisllov, & Tronin, 2013; KAI, 1976; CFD simulation of 3D flowfield in a gas centrifuge, 2006) و به تحلیل رفتار گاز درون روتور سانتریفیوژ پرداخته-اند. در مطالعه حاضر با استفاده از روش عددی حجم محدود، جریان درون روتور در سرعت‌های مختلف شبیه‌سازی شده و شعاع محدوده ناحیه مولکولی بررسی می‌گردد. با تشخیص محدوده ناحیه مولکولی و با توجه به عدم اعتبار معادلات ناویراستوکس در این ناحیه، می‌توان از روش‌های مولکولی برای تحلیل دقیق‌تر رفتار گاز بهره برد. از اینرو تعیین ناحیه مولکولی در شرایط مختلف از اهمیت خاصی برخوردار خواهد بود.

معادلات حاکم بر جریان گاز:

با توجه به اینکه معادلات حاکم بر حرکت سیال، بسیار پیچیده و غیرخطی هستند، امکان حل دقیق آن‌ها میسر نبوده و استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای حل آن‌ها لازم می‌باشد. کلیه روش‌های حل عددی معادلات، از استراتژی تقریباً یکسانی استفاده می‌کنند. ابتدا، فضای محاسباتی که جریان در آن مورد تحلیل قرار

¹ Long rotor

² Boundary layer



خواهد گرفت، به تعداد زیادی المان هندسی که آن‌ها را شبکه می‌نامند تقسیم می‌شود. سپس معادلات حاکم بر جریان با روش مناسب گسسته‌سازی می‌شوند. آنگاه گرادیان‌ها و شارها، گسسته‌سازی شده و با روش‌های استاندارد که مناسب مسئله موردنظر هستند محاسبه و در معادلات جایگذاری می‌شوند. نهایتاً مسئله با استفاده از روش تکرار حل شده و مجهولات در کل ناحیه حل به دست می‌آیند. گام نخست برای بررسی مسئله حاضر تعیین معادلات حاکم بر جریان می‌باشد. معادلات حاکم بر گاز به صورت زیر بیان شده است [9].

معادله بقای جرم:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1)$$

معادله بقای مومتم (بدون در نظر گرفتن نیروهای حجمی):

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V V) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (2)$$

معادله بقای انرژی:

$$\frac{\partial(\rho e_s)}{\partial t} + \nabla \cdot [V(\rho e_s)] = -\nabla \dot{q} - \nabla \cdot (p v) + \nabla \cdot (\tau \cdot v) \quad (3)$$

فرض می‌شود گاز کاری همانند یک گاز کامل رفتار کند بنابراین از معادله حالت گاز ایده‌آل استفاده می‌شود. در این روابط $e_s = C_v T$ می‌باشد. علاوه بر این شار حرارتی q با استفاده از فرمول فوریه ($q = -k \nabla T$) محاسبه می‌شود که T دما و K ضریب هدایت حرارتی است. برای حل این معادلات نیاز به حلگر مناسب می‌باشد. با توجه به مسئله حاضر که در آن جریان به صورت تراکم‌پذیر و با ماخ بالا می‌باشد نیاز است از حلگر تراکم‌پذیر بر مبنای دانسیته استفاده شود [10]. لازم به ذکر است مدل به صورت متقارن محوری در نظر گرفته می‌شود.

همان‌طور که ذکر گردید به دلیل سرعت دورانی بسیار بالای روتور سانتریفیوژ، بخش عمده‌ای از جریان نزدیک دیواره قرار می‌گیرد و در وسط روتور تقریباً فضای خلأ ایجاد می‌شود. در ناحیه نزدیک دیواره فرض پیوستگی برقرار می‌باشد؛ بنابراین معادلات حاکم بر جریان معادلات ناویراستوکس بوده که با استفاده از روش‌های عددی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) حل می‌گردد. در ناحیه وسط روتور فرض پیوستگی برقرار نمی‌باشد؛ بنابراین نمی‌توان از معادلات ناویراستوکس در ناحیه رقیق استفاده کرد. فرض پیوستگی جریان با توجه به عدد نادسن



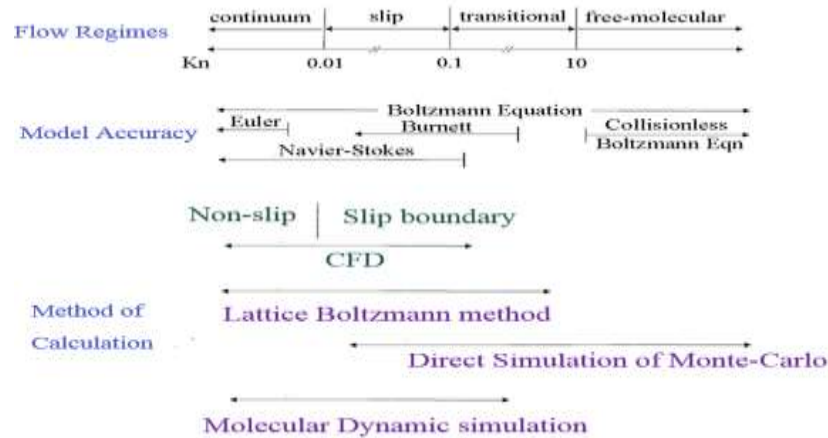
ارزیابی می‌گردد. با توجه به مراجع موجود معادلات ناویراستوکس تا عدد نادسن ۰/۱ قابل اعتبار خواهد بود (Stephani, Goldstein, & Varghese, 2013). عدد نادسن عددی بدون بعد است که به صورت نسبت میانگین پوش آزاد به یک بعد مشخصه سیستم تعریف می‌گردد:

$$Kn = \frac{\lambda}{L} \tag{4}$$

که در این رابطه میانگین پوش آزاد طبق رابطه زیر بدست می‌آید و بعد مشخصه سیستم می‌تواند شعاع روتور باشد.

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} p n d^2} \tag{5}$$

که در این رابطه k_B ثابت بولتزمن، T دما، d شعاع مولکول هگزا فلوراید اورانیم و p فشار می‌باشد. در شکل ۱ رژیم‌های مختلف جریان، مدل‌های مورد استفاده برای آنالیز این رژیم‌ها و همچنین روش‌های محاسباتی برای هر مدل مشخص شده است.

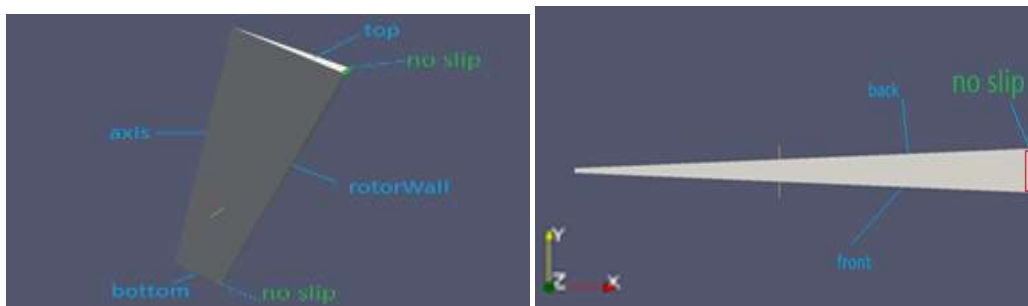


شکل ۱. تعیین محدوده عدد نادسن برای رژیم‌های مختلف جریان [12]

همان‌طور که مشاهده شد معادلات ناویراستوکس با استفاده از شرط مرزی لغزش تا عدد نادسن ۰/۱ قابل اعتبار خواهد بود در حالیکه با توجه به مراجع موجود، در قسمت مرکزی روتور، نادسن بزرگتر از ۰/۱ خواهد شد [13].
تشریح مسئله:

*Characteristic dimension

مسئله حاضر شبیه‌سازی جریان گاز درون روتور سانتریفیوژ می‌باشد که به صورت یک استوانه دوار در حالت متقارن محوری مدل‌سازی می‌گردد. ابعاد هندسی مدل در نظر گرفته شده دارای ارتفاع ۱ متر و شعاع ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. هندسه مسئله در شکل ۲ در نماهای مختلف نشان داده شده است. همچنین محدوده اعمال شرط مرزی عدم لغزش/لغزش روی کپ‌های بالا و پایین (نزدیک دیواره روتور، شرط عدم لغزش اعمال شده است) نشان داده شده است. تعداد سلول‌های در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی حاضر ۳۰۰۰۰ می‌باشد به طوریکه در کنار دیواره و کپ‌های بالا و پایین از شبکه‌بندی ریزتری استفاده شده است.



شکل ۲. رسم قطعی از روتور سانتریفیوژ

شرایط اولیه برای میدان سرعت صفر، برای دما ۳۱۰ کلوین و برای فشار ۱۵۰ پاسکال در نظر گرفته شده است. با توجه به رابطه حالت گاز ایده آل و دما و فشار اولیه در نظر گرفته شده، جرم اولیه درون روتور ۰/۶ گرم محاسبه می‌گردد. شرایط مرزی مسئله به صورت جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱. شرایط مرزی مسئله حاضر

شرط مرزی سرعت	شرط مرزی دما	مرز
Slip	$T=300 \text{ k (constant)}$	دیوار محور
noSlip	$\frac{\partial T}{\partial z} = 20$	دیوار روتور
noSlip 2mm	$T=320 \text{ k (constant)}$	

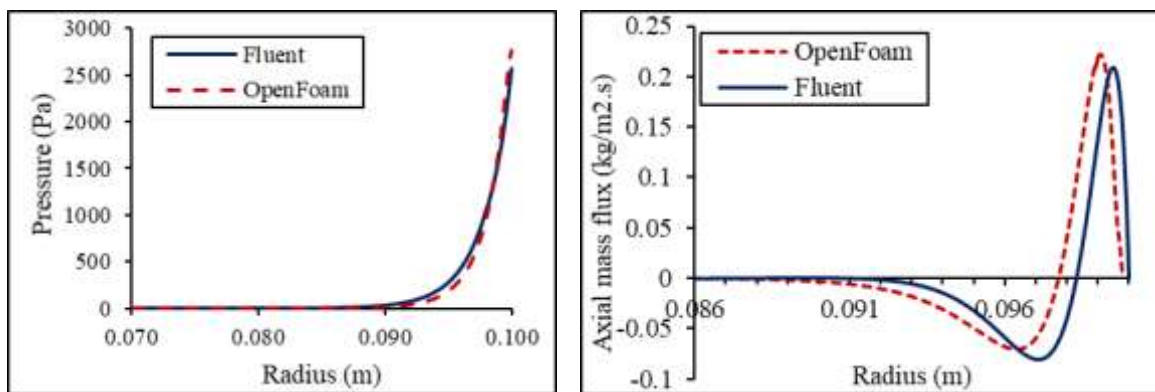


Slip		کپ بالا
noSlip 2mm	T=300 k (constant)	کپ پایین
Slip		

خصوصیات گاز UF_6 در نظر گرفته شده در این شبیه‌سازی بدین صورت است که جرم مولکولی برابر 352 gr/mol ، ضریب گرمای ویژه برابر 371 j/kg K ، ویسکوزیته برابر $1.8e-5 \text{ pa. sec}$ و عدد پرانتل برابر با 0.95 می‌باشد.

نتایج:

برای بررسی صحت و دقت مطالعه حاضر، تغییرات فشار و شار جرمی محوری با نرم افزار تجاری و معتبر فلوئنت مقایسه می‌گردد. در فلوئنت حل بر اساس روش حجم محدود، حلگر پایای بر پایه چگالی و با استفاده از روش *roe* گسسته‌سازی انجام شده در حالیکه در حل عددی حاضر با استفاده از نرم افزار این فوم بر اساس روش حجم محدود، حلگر گذرای بر پایه چگالی و با استفاده از روش کورگانو-تادمور گسسته‌سازی انجام شده است. به علت وجود محرک‌های دمایی در شبیه‌سازی حاضر، جریان چرخشی درون روتور ایجاد می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد با مقایسه مقادیر بدست آمده، روش حل و دقت حلگر مورد استفاده در مقایسه با نرم افزار فلوئنت قابل قبول می‌باشد. شار جرمی محوری و توزیع فشار برای ماخ $6/5$ و در ارتفاع میانی ($Z=0.5 \text{ m}$) بدست آمده است.

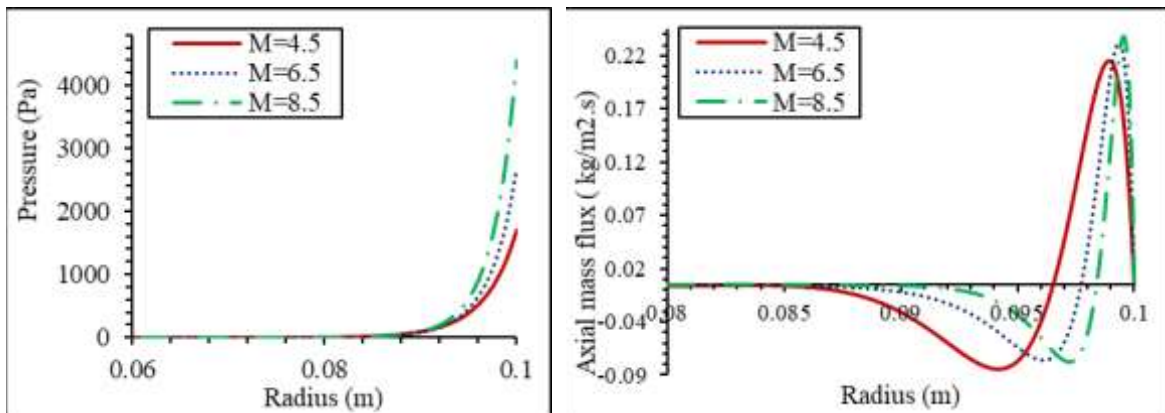


شکل ۳. تغییر شار جرمی محوری و فشار در راستای شعاعی در ارتفاع میانی

مسئله حاضر در سرعت‌های متفاوت روتور بررسی شده است. بدین منظور تغییر شار جرمی محوری برای سه ماخ، $4/5$ ، $6/5$ و $8/5$ در شرایط اعمال محرک دمایی و مطابق با شرایط داده شده در جدول ۱ برای ارتفاع میانی

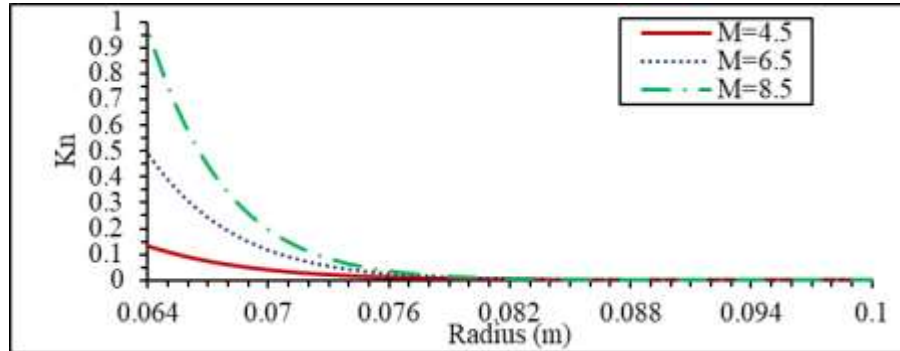


روتور رسم شده است. نمودارهای فشار و جریان محوری برای سه ماخ متفاوت بدست آمده است. تغییرات فشار در جهت شعاعی در ارتفاع میانی روتور رسم شده است.



شکل ۴. تغییرات فشار و شار جرمی محوری در ارتفاع میانی روتور برای سه ماخ متفاوت

با مشاهده نمودارهای بدست آمده مشخص گردید که با افزایش عدد ماخ، جرم بیشتری از گاز به دیواره روتور نزدیک شده و فشار گاز روی دیواره روتور افزایش یافته است. همچنین جریان محوری به دیواره روتور نزدیک‌تر شده و مقدار بیشینه آن هم افزایش می‌یابد که این نکته کاملاً مشابه با نتایج مطالعات سایر محققین می‌باشد [14]. در شکل ۵ تغییرات عدد نادسن با شعاع برای روتور در سه ماخ متفاوت برای مقطع میانی روتور رسم شده است. با مشاهده عدد نادسن ($Kn > 0.1$)، ایجاد شدن ناحیه مولکولی در قسمت مرکزی روتور قابل مشاهده می‌باشد و می‌توان محدوده ناحیه پیوسته و ناحیه مولکولی را تشخیص داد. قابل ذکر است در مطالعات دیگر انجام گرفته توسط سایر محققین هم نتایج مشابه مشاهده شده و به تشکیل ناحیه مولکولی در قسمت مرکزی روتور اشاره شده است [15]. بنابراین به منظور شبیه‌سازی دقیق‌تر با توجه به ناحیه مولکولی به وجود آمده ضروری است ناحیه مولکولی با روش دیگری مانند روش DSMC مدل شود. از اینرو یکی از مزیت‌های نرم افزار اپن فوم نسبت به نرم افزار فلوئنت و سایر مدل‌های موجود در مطالعات دیگر این است که قابلیت حل ناحیه مولکولی و کوپل دو ناحیه پیوسته و مولکولی در نرم افزار اپن فوم وجود دارد که از آن در کارهای بعدی بهره‌گیری خواهد شد.



شکل ۵. تغییرات عدد نادسن در ارتفاع میانی روتور برای سه ماخ متفاوت

با توجه به نمودار بالا مشاهده گردید با افزایش عدد ماخ، جرم بیشتری از گاز در کنار دیواره جمع شده و ناحیه مرکزی رقیق‌تر گردیده است به طوریکه مرز ناحیه مولکولی در ماخ $4/5$ ، $6/5$ و $8/5$ به ترتیب در شعاع $0/065$ ، $0/07$ و $0/072$ واقع شده است.

بحث و نتیجه‌گیری:

در این مطالعه با هدف بررسی اثر سرعت دورانی دیواره روتور بر جریان گاز درون آن، به شبیه‌سازی روتور با نرم‌افزار اپن فوم پرداخته شد. مشخص گردید که به دلیل نیروی گریز از مرکز، جرم زیادی از گاز در کنار دیواره جمع می‌گردد. به همین علت فشار در راستای شعاعی از مرکز به سمت دیواره به صورت نمایی افزایش یافته است و هر چه عدد ماخ بزرگتر گردد مقدار بیشتری از گاز کنار دیواره جمع می‌گردد و ناحیه مرکزی رقیق‌تر می‌گردد. از اینرو لازم است مرز ناحیه پیوسته و مولکولی تعیین شده و با استفاده از روش‌های مولکولی ناحیه رقیق‌سازی می‌گردد که در این راه استفاده از نرم‌افزار اپن فوم که قابلیت حل مولکولی و حل ناحیه پیوسته را دارد پیشنهاد می‌گردد.

منابع

- [1] Soubbaramayer, "centrifugation," *Applied Physics*, vol. 35, pp. 183-244, 1979.
- [2] J. Hu, C. Ying and S. Zeng, "Overall Separation Factor in a Gas Centrifuge Using a Purely Axial Flow Model," *Separation Science and Technology*, vol. 40, pp. 2139-2152, 2005.
- [3] D. R. Olander, "The Theory of Uranium Enrichment by the Gas Centrifuge," vol. 8, pp. 1-33, 1981.



- [4] Brouwers, "On Compressible Flow in a Gas Centrifuge and its Effect on the Maximum Separative Power.," *Nuclear Technology*, vol. 39, 1978.
- [5] P. Migliorini, "Modeling and Simulation of Gas Centrifuge Cascade for Enhancing the Efficiency of IAEA Safeguards," pp. 1-158, 2013.
- [6] T. KAI, "Basic Characteristics of Centrifuges, (III) Analysis of Fluid Flow in Centrifuges," *Journal of nuclear science and technology*, vol. 14, pp. 267-281, 1976.
- [7] S. Bogovalov, V. kislov and I. Tronin, "Verification of numerical codes for modeling of the flow and isotope separation in gas centrifuges," *Computers & Fluids*, vol. 86, pp. 177-184, 2013.
- [8] D. JIANG and S. Zeng, "CFD simulation of 3D flowfield in a gas centrifuge," *International Conference on Nuclear Engineering July 17-20, Miami, Florida, USA, 2006*.
- [9] F. M. White, *Fluid Mechanics*, Mc-Graw-Hill, 1998.
- [10] R. Petrova, *Finite Volume Method – Powerful Means of Engineering Design*, Croatia: Romana Vukelic, 2012.
- [11] K. Stephani, D. Goldstein and P. Varghese, "A non-equilibrium surface reservoir approach for hybrid DSMC/Navier–Stokes particle generation," *Journal of Computational Physics*, vol. 232, pp. 468-481, 2013.
- [12] H. Ya-Ling and T. Wen-Quan, "Multiscale Simulation of heat transfer and fluid flow problem," *Heat transfer*, vol. 134, no. 3.
- [13] V. Borisevich, O. Morozov and O. Godisov, "numerical simulation of bellows effect on flow and separation of uranium isotope in a supercritical gas centrifuge," *Nuclear Instrument and method in physics research*, vol. 455, pp. 487-494, 2000.
- [14] H. G. Wood and J. B. Morton, "Onsager's Pancake Approximation for the fluid dynamics of a gas centrifuge," *Fluid Mech.*, vol. 101, pp. 1-31, 1980.
- [15] D. Jiang and S. Zeng, "3D numerical study of a feed jet in a rotating flow-field," in *Journal of Physics: Conference Series 751*, 2016.