HAVONI AJRATISH JARAYONINING MATEMATIK MODELINI TUZISH

Sodiqov Baxtiyor Qahhor o‘g‘li
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti
E-mail: sodbaxtiyor@yandex.com

Annotatsiya. Havoni ajratish jarayonini matematik modellashtirish zamonaviy kimyo-texnologik ishlab chiqarishning muhim masalalaridan biridir. Chunki kislorod, azot va argon kabi gazlarni toza holda olish, ularni sanoat va tibbiyot ehtiyojlari uchun samarali yetkazib berishni ta’minlaydi. Mazkur ishda havoni ajratish jarayonining asosiy bosqichlari, jumladan, sovitish, rektifikatsiya va gaz oqimlarini nazorat qilish mexanizmlari matematik modellashtirish usullari asosida tahlil qilinadi. Modelni tuzishda differensial tenglamalar, issiqlik va massa almashinuv qonuniyatlari hamda dinamik jarayonlarni ifodalovchi matematik ifodalar qo‘llaniladi. Shuningdek, kompyuter simulyatsiyasi yordamida jarayonning barqarorligi, optimal rejimlari va energiya sarfini kamaytirish imkoniyatlari o‘rganiladi. Olingan natijalar havoni ajratish qurilmalarining samaradorligini oshirish, boshqaruv algoritmlarini takomillashtirish hamda sanoat miqyosida energiya tejamkor texnologiyalarni joriy etish uchun muhim ahamiyatga ega. Ushbu tadqiqot kelgusida intellektual boshqaruv tizimlari bilan integratsiya qilish imkoniyatlarini ham belgilaydi.

Kalit so‘zlar: Havoni ajratish jarayoni, Matematik model, Rektifikatsiya, Kislorod va azot ajratish, Argon olish texnologiyasi, Issiqlik va massa almashinuvi, Dinamik tizimlar, Kompyuter simulyatsiyasi, Energiya tejamkorlik, Boshqaruv algoritmlari.

Аннотация. Математическое моделирование процесса разделения воздуха является одной из важных задач современной химико-технологической промышленности. Это связано с тем, что получение кислорода, азота и аргона в чистом виде обеспечивает их эффективное использование для промышленных и медицинских нужд. В данной работе анализируются основные стадии процесса разделения воздуха, включая охлаждение, ректификацию и механизмы контроля газовых потоков, на основе методов математического моделирования. При построении модели применяются дифференциальные уравнения, законы тепло- и массообмена, а также математические выражения, описывающие динамические процессы. Кроме того, с помощью компьютерного моделирования исследуются устойчивость процесса, оптимальные режимы и возможности снижения энергозатрат. Полученные результаты имеют важное значение для повышения эффективности работы установок разделения воздуха, совершенствования алгоритмов управления и внедрения энергосберегающих технологий в

ISSN 3030-3907

промышленном масштабе. Данное исследование также определяет перспективы интеграции процесса с интеллектуальными системами управления.

Ключевые слова: Разделение воздуха, Математическая модель, Ректификация, Разделение кислорода и азота, Технология получения аргона, Тепло- и массообмен, Динамические системы, Компьютерное моделирование, Энергосбережение, Алгоритмы управления.

Abstract. Mathematical modeling of the air separation process is one of the important tasks of modern chemical and technological industry. This is due to the fact that obtaining oxygen, nitrogen, and argon in pure form ensures their efficient use for industrial and medical purposes. This study analyzes the main stages of the air separation process, including cooling, rectification, and mechanisms for controlling gas flows, based on mathematical modeling methods. When developing the model, differential equations, the laws of heat and mass transfer, as well as mathematical expressions describing dynamic processes are applied. In addition, computer simulation is used to study the stability of the process, optimal modes, and possibilities for reducing energy consumption. The results obtained are of great importance for improving the efficiency of air separation plants, enhancing control algorithms, and implementing energy-saving technologies on an industrial scale. This research also outlines the prospects for integrating the process with intelligent control systems.

Keywords: Air separation, Mathematical model, Rectification, Oxygen and nitrogen separation, Argon production technology, Heat and mass transfer, Dynamic systems, Computer simulation, Energy saving, Control algorithms.

Kirish

Havoni ajratish jarayoni zamonaviy sanoatning eng muhim yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi. Ushbu jarayon yordamida atmosferadagi asosiy gaz komponentlari kislorod, azot va argon toza holda olinib, turli tarmoqlarda samarali qo‘llaniladi. Xususan, kislorod metallurgiya sohasida yuqori haroratli jarayonlarni ta’minlashda, kimyo sanoatida oksidlanish reaksiyalarini tezlashtirishda, tibbiyotda esa nafas olish apparatlari va reanimatsion yordam vositalarida keng qo‘llanadi. Azot o‘zining inert xususiyatlari bilan oziq-ovqat mahsulotlarini uzoq muddat saqlashda, elektronika ishlab chiqarishda himoya muhitini yaratishda hamda ekologik muhofaza texnologiyalarida katta ahamiyat kasb etadi. Argon esa payvandlash jarayonlarida, elektr lampalari ishlab chiqarishda va yarimo‘tkazgich sanoatida keng miqyosda ishlatiladi. Shunday qilib, havoni ajratish jarayoni nafaqat alohida sanoat sohalarida, balki butun iqtisodiyotning samarali faoliyatida hal qiluvchi omil hisoblanadi.

ISSN 3030-3907

Havoni ajratish jarayonini samarali tashkil etishda matematik modellashtirish muhim o‘rin tutadi. Chunki model asosida issiqlik va massa almashinuvi jarayonlari, fazaviy muvozanat, dinamik o‘zgarishlar chuqur tahlil qilinadi. Matematik model yordamida jarayonning turg‘un ishlashi uchun zarur bo‘lgan shartlar aniqlanadi, energiya sarfi kamaytirish imkoniyatlari belgilab olinadi va optimal ish rejimlarini tanlash imkoniyati yaratiladi. Bundan tashqari, kompyuter simulyatsiyasi yordamida turli rejimlarni tajriba o‘tkazmasdan virtual muhitda sinash mumkin bo‘lib, bu vaqt va resurslarni tejash, prognozlarning aniqligini oshirish hamda xavfsizlikni ta’minlashda alohida ahamiyat kasb etadi.

ADABIYOTLAR TAHLILI

Havoni ajratish jarayonining matematik modeli bo‘yicha olib borilgan ilmiy izlanishlar shuni ko‘rsatadiki, ushbu soha nafaqat nazariy, balki keng amaliy ahamiyatga ham ega. Adabiyotlar tahlilida bir nechta muhim ishlarni ko‘rib chiqish mumkin. Masalan, M. A. Anisimova, A. Ya. Gilmanov, A. V. Kuznetsov va A. P. Shevelev tomonidan yozilgan “Mathematical Modeling of the Separation of a Mixture of Nitrogen and Oxygen Using a Selective Membrane” nomli maqolada membrana texnologiyasi asosida kislorod va azotni ajratish jarayoni uchun dinamik model ishlab chiqilgan. Mualliflar gaz oqimining membrana ichidagi va tashqarisidagi konsentratsiya taqsimotini matematik tenglamalar yordamida tahlil qilganlar. Ushbu ishning kuchli tomoni shundaki, u vaqt bo‘yicha o‘zgarishlarni hisobga oladi va nazorat hamda optimallashtirish imkonini beradi. Shuningdek, model tajriba natijalari bilan solishtirilganligi uning ishonchliligini oshiradi. Ammo maqolaning zaif jihati shundaki, u faqat membrana asosida ajratishga qaratilgan va kriogen rektifikatsion yoki adsorbsion texnologiyalar bilan solishtirilmagan. Bundan tashqari, real ishlab chiqarishdagi issiqlik o‘zgarishlari, membrananing eskirishi kabi muhim omillar modelga kiritilmagan bo‘lishi mumkin.[1]

Yana bir diqqatga sazovor tadqiqot H. Zhou va hamkorlari tomonidan yozilgan “Dynamic Modeling of Heat-Integrated Air Separation” nomli maqolada taqdim etilgan bo‘lib, unda ichki issiqlik integratsiyalangan rektifikatsion kolonna ustunlari yordamida havoni ajratish jarayoni o‘rganilgan. Mualliflar nochiziqli model orqali massa va issiqlik almashinuvi, bug‘-suyuqlik fazalarining muvozanati bo‘yicha konsentratsiya taqsimotini chuqur tahlil qilganlar. Ushbu maqolaning afzalligi shundaki, issiqlik integratsiyasi hisobga olingan va energiya samaradorligi oshirilgan holda real jarayonning turg‘unligi ko‘rsatilgan. Dinamik simulyatsiya yordamida boshlang‘ich va o‘tish rejimlari ham o‘rganilgan. Biroq modelning murakkabligi yuqori bo‘lib, hisoblash jarayonlari ko‘p vaqt talab qiladi va iqtisodiy cheklovlar yetarlicha yoritilmagan. Sanoat sharoitida qo‘llashda uning texnik

ISSN 3030-3907

nuqsonlari va issiqlik yo‘qotishlari modelda aks etmasligi mumkin. Ushbu ikki maqola tahlilidan ko‘rinadiki, havoni ajratish jarayonini modellashtirish turli yondashuvlar orqali amalga oshirilishi mumkin.[2]

TADQIQOT METODOLOGIYASI

Ushbu maqolada ushbu ilmiy natijalari amaliy sharoitda qo‘llashga moslashtirilgan metodologiya taklif qilinadi. Maqolada differensial tenglamalar yordamida matematik model tuzish, ma’lumotlarni qayta ishlash, imitatsion modellashtirish va zamonaviy avtomatik boshqarish nazariyasining sinovdan o‘tgan usullari kabi tadqiqot metodlaridan foydalaniladi. Matematik modellash jarayonining natijalarini Matlab dasturiy muhitida simulyatsiya qilib tekshiriladi.

MUHOKAMA VA NATIJALAR

Havoni ajratish kriogen usulida atmosfera havosi siqilib sovutiladi va rektifikatsiya kolonnasiga yuboriladi. Kolonnada azot, kislorod va argon ularning qaynash harorati farqlariga ko‘ra ajratiladi: azot yuqorida, kislorod pastda, argon esa o‘rtada to‘planadi. Jarayon davomida ikkita asosiy hodisa kuzatiladi: issiqlik uzatilishi va massa uzatilishi. Issiqlik sovutgichlar orqali boshqarilib, gazlarning bug‘-suyuqlik muvozanati ta’minlanadi. Massa almashinuvi traylar yoki qadoqlangan qatlamlarda sodir bo‘lib, konsentratsiyalar bosqichma-bosqich o‘zgaradi.[3] Model uchta omilga asoslanadi: harorat (t), bosim $p(t)$ va konsentratsiyalar. Harorat sovutish quvvatiga, bosim kompressor va kengaytirgichlarga, konsentratsiyalar esa massa uzatish tezligiga bog‘liq. Boshqaruv signali sifatida (t) – sovutish yoki bosim beriladi. Chiqishlar sifatida: y_1 kislorod konsentratsiyasi, 2 azot konsentratsiyasi olinadi.

Havoni ajratish ustunining soddalashtirilgan dinamik tenglamalari quyidagicha yoziladi:

$$\mathrm{C}_T \frac{dT(t)}{dt} = -k_Q(T(t) - T_c) + au(t)$$

$$V\frac{dC_{O_2}(t)}{dt} = -k_m\left(C_{o_2}(t) - C_{O_2}^{eq}(T(t))\right)$$

$$V\frac{dC_{N_2}(t)}{dt} = -k_m\left(C_{N_2}(t) - C_{N_2}^{eq}(T(t))\right) \qquad (1)$$

Bu yerda, $T(t)$ - ustun ichidagi o‘rtacha harorat, C_T - issiqlik sig‘imi, k_Q - sovutish koeffitsienti, T_c - sovutgichning temperaturasi,α - boshqaruv signali ta’sir koeffitsienti, V - hajm, k_m - massa uzatish koeffitsienti, $C_{N_2}^{eq}, C_{O_2}^{eq}$— fazaviy muvozanatdagi konsentratsiyalar (haroratga bog‘liq).

Endi ish rejimi atrofida (nominal qiymatlar: $T_0, C_{N_2,0}, C_{O_2,0}$) chiziqlashtirib yozib olinadi:

ISSN 3030-3907

$$\Delta\dot{T}(t) = -\frac{k_Q}{C_T}\Delta T(t) + \frac{a}{C_T}\Delta u(t)$$

$$\Delta\dot{C_{O_2}}(t) = -\frac{k_m}{V}\Delta C_{O_2}(t) + \beta_1\Delta u(t)$$

$$\Delta\dot{C_{N_2}}(t) = -\frac{k_m}{V}\Delta C_{N_2}(t) + \beta_2\Delta u(t) \qquad (2)$$

bu yerda, β_1,β_2 - muvozanat funksiyalarining hosilalari.
Endi (2) tenglamani holat vektorini tuzib olinadi:

$$x(t) = \begin{bmatrix} \Delta T(t) \\ \Delta C_{O_2}(t) \\ \Delta C_{N_2}(t) \end{bmatrix}, u(t) = \Delta u(t)$$

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t),\ y(t) = Cx(t) \qquad (3)$$

Matritsalar holatida ifodalab olinsa:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{k_Q}{C_T} & 0 & 0 \\ \beta_1 & -\frac{k_m}{V} & 0 \\ \beta_2 & 0 & -\frac{k_m}{V} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{a}{C_T} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (4)$$

(3) va (4) tenglamalarni laplas tasvirini topib, 2 ta uzatish funksiyasi tuzib olinadi:

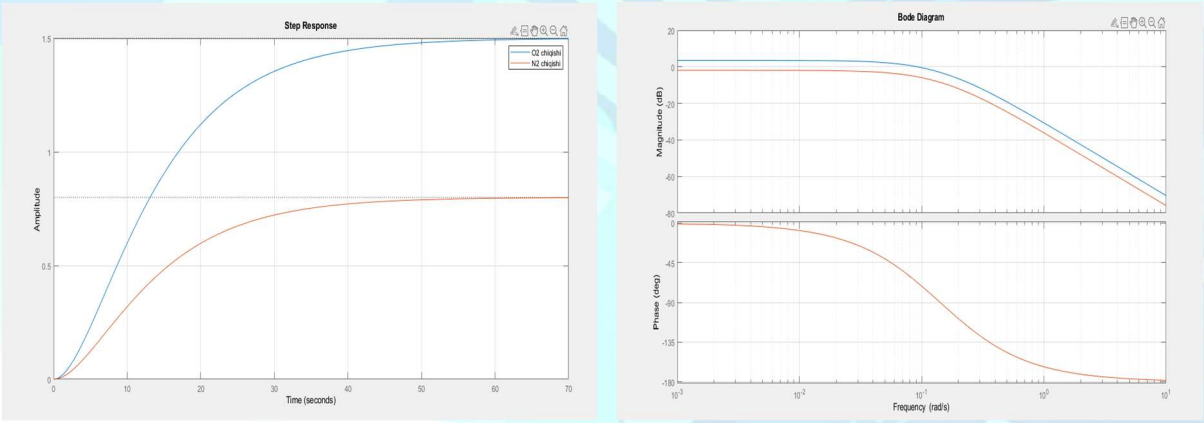
$$G_{O_2}(p) = \frac{K_1}{(\tau_T p + 1)((\tau_C p + 1)}, \qquad G_{N_2}(p) = \frac{K_2}{(\tau_T p + 1)((\tau_C p + 1)}, \qquad (5)$$

Bu yerda, $\tau_T=C_T/k_Q$, $\tau_C=V/k_m$, K_1 va K_2 esa issiqlik-massa o‘zaro ta’siridan kelib chiqqan kuchaytirish koeffitsientlari.[5-7] Tajribalardan topilgan natijaviy tahlillar asosida $K_1=1.5$, $K_2=0.8$, $\tau_T=5$, $\tau_C=10$ koeffitsiyentlarning qiymatlari olinadi.

Olingan tadqiqot natijalarini amaliy jihatdan tekshirish bosqichi sifatida MATLAB dasturidan foydalanish rejalashtiriladi. Chunki MATLAB jarayonlarni modellashtirish va nazorat qilish imkonini beradigan qulay matematik muhit hisoblanadi. Havoni ajratish jarayonidan olingan matematik model dasturga kiritilib, uning asosida tizimning dinamik xususiyatlari, ya’ni vaqt bo‘yicha javobi va chastotaviy tavsiflari tahlil qilinadi. Avvalo, model uchun o‘tish xarakteristikasi aniqlanadi. Bu xarakteristika yordamida tizimga berilgan kirish signaliga javoban chiqish ko‘rsatkichlari qanday tezlikda va qanday sifatda turg‘unlashishini kuzatish mumkin bo‘ladi. O‘tish xarakteristikasidan asosiy parametrlar – rostlash vaqti, o‘tish jarayonidagi ortiqcha tebranish darajasi hamda statik xatolik kabi ko‘rsatkichlar olinadi. Ularning barchasi jarayonning turg‘unligi va boshqaruv

ISSN 3030-3907

sifati haqida to‘liq tasavvur beradi. Olingan MATLAB natijalari havoni ajratish jarayonining qurilgan matematik modelini amaliy jihatdan baholash imkonini berdi. Avvalo, Bode diagrammasi ko‘rib chiqildi. Diagrammada ko‘rinib turibdiki, tizim chastota ortishi bilan amplituda kamayib boradi va past chastotada turg‘un, yuqori chastotalarda esa signallar susaytiriladi. Bu esa modelning fizik mazmuniga to‘la mos keladi, chunki real rektifikatsion kolonna yuqori chastotali o‘zgarishlarga tez javob bera olmaydi va ularni filtrlaydi.[8] Fazaviy xarakteristika esa chastota ortishi bilan pasayib borishini ko‘rsatmoqda, ya’ni jarayon inert xarakterga ega.



a) **b)**

1-rasm. Azot va kislorod konsentratsiyasi parametrlarining o ‘tish grafigi (a) va turg‘unlik zahirasini qiymatlarining grafik ko‘rinishi (b).

Fazaning –90° ga yaqinlashishi tizimning tipik ikkinchi tartibli o‘tish jarayonlariga xos ekanligini tasdiqlaydi. Amplituda va faza diagrammalaridan ko‘rinadiki, tizimning turg‘unlik zaxirasi yetarli bo‘lib, u real sharoitda tashqi ta’sirlarga bardosh bera olishini bildiradi. O‘tish grafigi orqali jarayonning vaqt bo‘yicha javobi tahlil qilindi. Grafikdan ko‘rinib turibdiki, kislorod chiqishi (y_1) tezroq turg‘unlashib, yuqori amplituda qiymatiga yetadi, azot chiqishi (y_2) esa asta-sekin o‘sib, nisbatan pastroq darajada to‘xtaydi. Bu natija fizik jarayon mohiyatiga mos keladi, chunki kriogen sharoitda kislorodning konsentratsiyasi yuqori darajaga erishishi, azotning esa pastroq konsentratsiyada chiqishi tabiiydir. Turg‘unlashish vaqti taxminan 40–50 soniya oralig‘ida bo‘lib, bu jarayonni real rektifikatsion kolonna uchun qoniqarli dinamik javob sifatida baholash mumkin.[9]

Natijalar umumiy tahlil qilinadigan bo‘lsa, qurilgan model nafaqat nazariy, balki amaliy jihatdan ham turg‘un ishlashini ko‘rsatmoqda. Bode diagrammasidagi faza va amplituda xususiyatlari tizimning chastotaviy turg‘unligini tasdiqladi, step response esa o‘tish jarayonida ortiqcha tebranishlar yo‘qligini va chiqish signallarining aniq ravishda turg‘un qiymatga intilishini ko‘rsatdi.

XULOSA

ISSN 3030-3907

Ushbu tadqiqotda havoni ajratish jarayoni uchun matematik model ishlab chiqildi va u MATLAB muhitida tekshirildi. Fizik model issiqlik balansi, massa balansi hamda fazaviy muvozanat qonunlariga asoslanib tuzildi va chiziqlashtirish orqali uzatish funksiyasi shakliga keltirildi. Olingan model asosida tizimning dinamik xususiyatlari tahlil qilinib, Bode diagrammasi yordamida turg‘unlik zaxirasi, birlik pog‘onali signal yordamida esa o‘tish jarayonlari baholandi. Natijalar shuni ko‘rsatdiki, model real rektifikatsion kolonna jarayoniga mos keladi, kislorod va azot chiqishlari turg‘un qiymatga yetadi hamda ortiqcha tebranishlarsiz silliq o‘tish xarakteristikalarini namoyon qiladi. Chastotaviy tahlil tizimning yetarli amplituda va faza zaxirasiga ega ekanini ko‘rsatib, turg‘un ishlashini tasdiqladi. Shunday qilib, ishlab chiqilgan matematik model havoni ajratish jarayonining asosiy fizik xususiyatlarini to‘liq aks ettiradi, nazariy hamda amaliy jihatdan ishonchli natija beradi va kelgusida energiya samaradorligini oshirish, optimal boshqaruv tizimlarini loyihalash hamda texnologik rejimlarni takomillashtirish uchun mustahkam ilmiy asos bo‘lib xizmat qiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO’YXATI

1. 1.Anisimova, M. A., Gil’manov, A. Y., Kuznetsov, A. V., & Shevelev, A. P. (2023). Mathematical Modeling of the Separation of a Mixture of Nitrogen and Oxygen Using a Selective Membrane. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 96(6), 1542-1548.
2. 2.Zhou, H., Xia, X., & Cong, L. (2025). Dynamic Modeling of Heat-Integrated Air Separation Column Based on Nonlinear Wave Theory and Mass Transfer Mechanism. Processes, 13(4), 1052. https://doi.org/10.3390/pr13041052
3. 3.Huang, R., Zavala, V. M., & Biegler, L. T. (2009). Advanced step nonlinear model predictive control for air separation units. Journal of Process Control, 19(4), 678-685.
4. 4.Dias, L. S., Pattison, R. C., Tsay, C., Baldea, M., & Ierapetritou, M. G. (2018). A simulation-based optimization framework for integrating scheduling and model predictive control, and its application to air separation units. Computers & Chemical Engineering, 113, 139-151.
5. 5.Cao, Y., Swartz, C. L., & Baldea, M. (2011, June). Design for dynamic performance: Application to an air separation unit. In Proceedings of the 2011 American Control Conference (pp. 2683-2688). IEEE. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document /5990942
6. 6.Botirov, T. V., & Sodiqov, B. Q. (2023). Use of intellectual regulators in the production of polyvinyl chloride. Journal of Advances in Engineering Technology, (4), 31-35.

ISSN 3030-3907

7. 7.Vassilyev, S. N., Kudinov, Y. I., Pashchenko, F. F., Durgaryan, I. S., Kelina, A. Y., Kudinov, I. Y., & Pashchenko, A. F. (2020). Intelligent control systems and fuzzy controllers. II. trained fuzzy controllers, fuzzy PID controllers. Automation and remote control, 81(5), 922-934.
8. 8.Xu, Z., Zhao, J., Chen, X., Shao, Z., Qian, J., Zhu, L., ... & Qin, H. (2011). Automatic load change system of cryogenic air separation process. Separation and Purification Technology, 81(3), 451-465.
9. 9.Zhu, Y., Legg, S., & Laird, C. D. (2010). Optimal design of cryogenic air separation columns under uncertainty. Computers & Chemical Engineering, 34(9), 1377-1384.

ISSN 3030-3907