

March 2024

STUDY OF REACTIVE DISTILLATION EQUIPMENT FOR ETERIFICATION PROCESS

Abbos ELMANOV

Shahrisabz Branch of the Tashkent Institute of Chemical Technology, Shakhrisabz, Uzbekistan,
abbos.tktishf@gmail.com

Abdulaziz BAKHTIYOROV

Shahrisabz branch of the Tashkent Institute of Chemical Technology, Shakhrisabz, Uzbekistan,
abdubakh04@gmail.com

Adham NORKOBILOV


Shakhrisabz branch of the Tashkent Institute of Chemical Technology, Shakhrisabz, Uzbekistan,
adham.norkobilov@gmail.com

Olimjon MAKSUDOV

Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan, olimjonmaksudov5@gmail.com

Zarif ORIPOV

Follow this and additional works at: <https://cce.researchcommons.org/journal>
Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan, zoripov@gmail.com

 Part of the [Catalysis and Reaction Engineering Commons](#), [Materials Science and Engineering Commons](#), [Other Chemical Engineering Commons](#), [Polymer Science Commons](#), and the [Process Control and Systems Commons](#)

Recommended Citation

ELMANOV, Abbas; BAKHTIYOROV, Abdulaziz; NORKOBILOV, Adham; MAKSUDOV, Olimjon; and ORIPOV, Zarif (2024) "STUDY OF REACTIVE DISTILLATION EQUIPMENT FOR ETERIFICATION PROCESS," *CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERING*: Vol. 2023: No. 4, Article 11.

DOI: 10.34920/cce2023411

Available at: <https://cce.researchcommons.org/journal/vol2023/iss4/11>

This Article is brought to you for free and open access by Chemistry and Chemical Engineering. It has been accepted for inclusion in CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERING by an authorized editor of Chemistry and Chemical Engineering. For more information, please contact zuchra_kadirova@yahoo.com.

STUDY OF REACTIVE DISTILLATION EQUIPMENT FOR ETHERIFICATION PROCESS

Abbos ELMANOV¹ (abbos.tktishf@gmail.com)
Abdulaziz BAKHTIYOROV¹ (abdubakh04@gmail.com)
Adham NORKOBILOV¹ (adham.norkobilov@gmail.com)
Olimjon MAKSUDOV² (olimjonmaksudov5@gmail.com)
Orifjon ZARIPOV² (zoripoff@gmail.com)

¹Shakhrisabz branch of the Tashkent Institute of Chemical Technology, Shakhrisabz, Uzbekistan

²Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

The purpose of this work is to study the chemical technological processes for etherification processes, and the reactive distillation unit, which carries out the reaction and separation process in one device, was chosen as the object of research. A reactive distillation system is examined to produce for the production of Ethyl Acetate (EtAc) via etherification of acetic acid (HAc) with ethanol. Optimization methods using sensitivity analysis are also conducted. Calculation of vapor liquid equilibrium of the mixture system is done using UNIFAC model. Heat integration from the distillate stream of the column to the acid feed stream and from bottom stream of the column to the ethanol stream with the purpose of saving reboiler duty of the reactive distillation column, which enhances the energy savings (at least 5%) of this process. The feasibility of the reactive distillation (RD) for EtAc production process was evaluated by rigorous simulation and optimization using the Aspen Plus software package. The effects of several designs and operating variables were also investigated for the proposed design.

Keywords: etherification, ethyl acetate, reactive distillation, aspen plus, unifac, modeling, heat integration

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКТИВНО-ДИСТИЛЛЯЦИОННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРОЦЕССА ЭТЕРИФИКАЦИИ

Аббос ЭЛМАНОВ¹ (abbos.tktishf@gmail.com)
Абдулазиз БФХТИЕВ¹ (abdubakh04@gmail.com)
Адхам ННОРКОБИЛОВ¹ (adham.norkobilov@gmail.com)
Олимжон МАКСУДОВ² (olimjonmaksudov5@gmail.com)
Орифжон ЗАРИПОВ² (zoripoff@gmail.com)

¹Шахрисабзский филиал Ташкентского химико-технологического института, Шахрисабз, Узбекистан

²Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан

Целью данной работы является изучение химико-технологических процессов для процессов этерификации, и в качестве объекта исследования была выбрана реакционно-ректификационная установка, осуществляющая реакцию и процесс разделения в одном аппарате. Исследована система реактивной дистилляции для получения этилацетата (EtAc) путем этерификации уксусной кислоты (HAc) этанолом. Также проводятся методы оптимизации с использованием анализа чувствительности. Расчет парожидкостного равновесия смешанной системы выполнен с использованием модели UNIFAC. Интеграция тепла из дистиллятного потока колонны в поток исходной кислоты и из кубового потока колонны в поток этанола с целью экономии ребойлерной нагрузки реакционно-ректификационной колонны, что повышает энергосбережение (не менее 5%) этот процесс. Возможность использования реактивной дистилляции (RD) для процесса производства EtAc была оценена путем тщательного моделирования и оптимизации с использованием программного пакета Aspen Plus. Эффекты нескольких конструкций и рабочих переменных также были исследованы для предлагаемой конструкции.

Ключевые слова: этерификация, этилацетат, реактивная дистилляция, aspen plus, unifac, моделирование, тепловая интеграция

ETERIFIKATSIYA JARAYONI UCHUN REAKTIV DISTILYATSIYA QURILMASINI TADQIQ QILISH

Abbos ELMANOV¹ (abbos.tktishf@gmail.com)
Abdulaziz BAKHTIYOROV¹ (abdubakh04@gmail.com)
Adham NORKOBILOV¹ (adham.norkobilov@gmail.com)
Olimjon MAKSUDOV² (olimjonmaksudov5@gmail.com)
Orifjon ZARIPOV² (zoripoff@gmail.com)

¹Toshkent kimyo-texnologiya instituti Shahrisabz filiali, Shahrisabz, O'zbekiston

²Toshkent Davlat Texnika Universitet, Toshkent, O'zbekiston

Ushbu ishdan maqsad eterifikatsiya jarayonlari uchun kimyoviy texnologik jarayonlarni o'rganish bo'lib, reaksiya va ajratish jarayoni bir qurilmada olib boriluvchi reaktiv distilyatsiya qurilmasi tadqiqot obyekti sifatida tanlab olindi. Sirka kislotasini (HAc) etanol bilan eterifikatsiyalash orqali etil atsetat (EtAc) ishlab chiqarish uchun reaktiv distillash tizimi o'rganildi. Sezgirlik tahlilidan foydalangan holda optimallashtirish usullari ham o'tkaziladi. Aralash tizimining bug'-suyuqlik muvozanatini hisoblash UNIFAC modeli yordamida amalga oshirildi. Qaynatgichdagi (reboylar) energiya yuklamasini tejash (kamida 5%) maqsadida distilyat oqimidan kislota oqimiga, kub qoldig'i oqimidan esa etanol oqimiga issiqlik integratsiyasi amalga oshirildi. EtAc ishlab chiqarish jarayoni uchun reaktiv distilyatordan (RD) foydalanish maqsadga muvofiqligi Aspen Plus dasturiy ta'minot to'plamidan foydalangan holda modellashtirish va optimallashtirish orqali baholandi. Taklif etilgan loyiha uchun jarayon va parametrlarning ta'siri ham o'rganildi.

Kalit so'zlar: eterifikatsiya, etil atsetat, reaktiv distillash, aspen plus, unifac, modellashtirish, issiqlik integratsiyasi

DOI: 10.34920/cce2023411

KIRISH

Etil atsetat (EtAc) laklar va sirt qoplamali qatronlar ishlab chiqarish uchun keng qo'llaniladi, dunyoda yillik ishlab chiqarish quvvati 3 million tonnadan ortiq [1]. EtAc asosan sirka kislotasi

(HAc) va etanol (EtOH) eterifikatsiyasi orqali ishlab chiqariladi. Odatda an'anaviy eterifikatsiya jarayoni xom ashyoning past konversiyasiga ega bo'lib, taxminan 65 foizni tashkil etadi. Bundan tashqari, ushbu an'anaviy jarayonlarda EtAc ni mahsulot sifatida tozalash yuqori energiya talab

etadi [2]. Reaksiyaga kirishuvchi moddalar va reaksiya mahsulotlari aralashmasi asosida to'rtta azeotrop xossasi mavjud bo'lgan tizim hosil bo'ladi (1-jadval). Ushbu azeotrop tizimlar sababli issiqxona gazlari miqdori ortadi. Ushbu ishda EtAc moddasini mahsulot sifatida ishlab chiqarish uchun qo'llaniladigan jarayonlarning texnik-iqtisodiy qiyosiy tahlillari o'rganilgan bo'lib, bunda uglerod gazlar emissiyasi ham hisobga olingan. Sanoat yillik global issiqxona gazlari emissiyasining uchdan bir qismini ishlab chiqarganligi sababli, ishlab chiqarish jarayonlarini loyihalashda bunday gazlar emissiyasini inobatga olish va ularni imkoniyat darajasida kamroq chiqindi sifatida chiqarish talab etiladi [3]. Kimyo sanoatida ekologik jihatdan barqaror va toza ishlab chiqarishga jarayonni intensivlashtirish orqali erishish mumkin [4]. Jarayonni intensivlashtirish usullariga ko'p funktsiyali reaktorlar [5], gibrid ajratish jarayonlari [6], muqobil energiya manbalari [7] va shu kabi boshqa texnologiyalar kiradi. An'anaviy reaktor va haydash kolonnasidan iborat ishlab chiqarish jarayoni bilan bir qatorda Reaktiv distillash (RD) usuli ham mavjud bo'lib, Reaktiv distillash (RD) jarayonlari efirlar, shu jumladan atsetatlar ishlab chiqarish uchun ham sanoat miqyosida keng qo'llaniladigan ko'p funktsiyali texnologiyalar sirasiga kiradi [8].

Etil atsetat ishlab chiqarishda reaksiya jarayonida hosil bo'lgan suv (shuningdek, xomashyo sifatida ishlatiladigan 90% spirt) doimiy ravishda ajratib olinadi. Tanlangan shartlar etil spirtiga qaraganda qimmatroq bo'lgan sirka kislotasining maksimal konversiyasini ta'minlaydi.

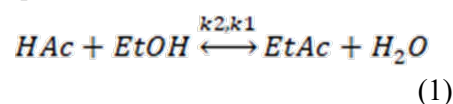
Reaktiv distillash uskunasi etanol va sirka kislotasi ishtirokidagi reaksiya unumining yuqori darajasiga erishish uchun reaksiya muvozanatini yengib o'tishga imkon beradi. O'z navbatida, distillash va reaksiya zonalari bilan ajratishning kombinatsiyasi bug'-suyuqlik muvozanatini o'rnatish jarayonida massa almashinish tezligi va kimyoviy kinetikaga ta'sir qiluvchi murakkab uzviy ta'sirlarga olib keladi. Ushbu o'zaro ta'sirlar jarayon dinamikasida murakkab bo'lgan nochiziqilik va murakkabliklarga sabab bo'ladi. Bu, o'z navbatida, ushbu tizimlarni loyihalashda katta qiyinchilik tug'diradi [9]. Jarayonlarni modellashtirish, loyihalash va optimal yechim ishlab chiqishda energiya sarfini tahlil qilish muhim bo'lib, bu o'z navbatida atmosferaga chiqayotgan uglerod gazlarini kamaytirish va bu orqali global isishga bo'lgan

salbiy ta'sirni qisqartirish ham muhim ahamiyat kasb etadi [10, 11].

Ushbu tadqiqotda etil atsetat ishlab chiqarish uchun uzluksiz ravishda ishlaydigan reaktiv distillash kolonnasining modeli o'rganilgan bo'lib, muvozanat cheklovlarini yengib o'tish, yuqori ko'rsatkichli ajratish natijalari, jarayon harajatlarini kamaytirish va zavod harajatlarini qisqartirish kabi natijalar ushbu tadqiqot natijalari sifatida keltirib o'tilgan.

Materiallar va metodlar

Jarayon tavsifi. Etanolning sirka kislotasi bilan ta'sirlashuvi natijasida etil atsetat va hosil suv bo'ladi. Reaktiv distillash qurilmasida hosil bo'ladigan ushbu qaytar reaksiya quyidagicha ifodalanadi [12]:



$$k_1 = 4619.43 \exp\left(\frac{-60500}{RT}\right) \quad (2)$$

$$k_2 = 3317.28 \exp\left(\frac{-53740}{RT}\right) \quad (3)$$

Bu yerda, k_1 va k_2 – reaksiya tezligini ifodalovchi qiymatlar bo'lib, ushbu qiymatlar reaksiya jarayoni natijasida Calvar va boshqalar tomonidan olingan [12].

Modellashtirish va kompyuter dasturlari (Aspen Plus) yordamida jarayonlarni tahlil qilish usullaridan foydalanib reaktiv distillash qurilmasida etil atsetat olish jarayoni o'rganildi. Bunda etil atsetatni sanoat mahsuloti sifatidagi tozaligini imkon qadar yuqori darajada olish maqsad qilib qo'yildi. Ushbu maqsadga erishish uchun avvalgi chop etilgan ishlarimizda o'rganilgan reaktiv distillash qurilmasi va modellashtirish usullaridan ham foydalanildi [8, 6, 3]. Avvalgi tadqiqot ishlarida asosan bir turdagi reaktiv distillash qurilmasining o'zi ishlashi bo'yicha jarayonlar ko'rilgan bo'lsa, ushbu ishda reaksiya qatlami turlicha bo'lgan jarayonlar ham ko'rib o'tilgan.

Noideal tizimni hisobga olgan holda termodinamik holatlarni hisoblash uchun UNIFAC tizimidan foydalanildi. UNIFAC modeli tizimdagi har bir tur uchun faollik koeffitsientini ikkita komponentga, ya'ni kombinatorik ($\ln\gamma_i^c$) va qoldiq

(lny_i^r) komponentlarga ajratadi. Bunda, qoldiq komponent aralashmadagi guruhlarining o'zaro ta'sirini hisobga olish uchun mo'ljallangan qoldiq ulush bo'lib, kombinatorial komponent esa molekulyar shakldagi farqlar tufayli entropik ta'sirlarni hisobga olish uchun mo'ljallangan kombinatsiyaviy ulushni tashkil etadi. i-molekula uchun faollik koeffitsientlari quyidagi tenglama bo'yicha taqsimlanadi [13]:

$$lny_i = lny_i^e + lny_i^r$$

Ushbu ishda ko'rib o'tilgan asosiy keys uchun reaktiv distillash qurilmasining sxematik diagrammasi 1-rasmda keltirib o'tilgan. Unga ko'ra 17 ta tarelkadan iborat bo'lgan reaktiv distillash kolonnasining kirishlari F_0 va F_1 mos ravishda kolonnaning sovutgich va qaynatgich qismlaridan kiritiladi. Kolonnaning nazariy bosqichlari tepadan boshlab raqamlangan bo'lib, eng tepa qismida sovutgich, eng past qismida esa qaynatgich joylashgan. Sirka kislota (HAc) mavjud bo'lgan F_0 kirish oqimi kolonnaning 1-tarelkasidan kiritiladi, F_1 , ya'ni 90 % ulushga ega etanol va suv aralashmasi esa kolonnaning quyi qismidan kiritiladi. Sirka kislota etanolga nisbatan kamroq uchuvchan bo'lganligi sababli doim etanol oqimiga qaraganda kolonnaning teparoq qismidan beriladi. Bazaviy keys sifatida tanlab olingan ishda kolonnaning butun qismi bo'ylab reaksiya jarayoni ro'y beradi deb hisoblandi. Kolonna bo'ylab bosim o'zgarmas va sovutgich aralashmani to'liq kondensatsiyalaydi deb hisoblandi. Kolonna spesifikatsiyasi va jarayon parametrlari 1-jadvalda keltirilgan.

Reaktiv distillash kolonnasi reaksiya jarayoni boradigan qatlam hamda ajratish jarayoni boradigan haydash qatlami mavjud bo'ladi. Reaksiya qatlamida suyuq aralashmaning bo'lish hajmi Aspen Plus dasturida sezgirlik tahlilini amalga oshirish orqali hisoblab chiqildi. Tahlil natijalariga ko'ra reaksiya qatlamida 70 litr hajm ushlab turiladigan bo'lsa eng yuqori miqdordagi Etil Atsetat hosil bo'lishi kuzatildi.

Modellashtirish natijalari

Modellashtirish natijalariga ko'ra normal sharoitda tizimda mavjud komponentlar to'rt xil sharoitda azeotrop xususiyatlari namoyon etadi. Ushbu xususiyatlarga ko'ra bunda gomogen aralashmada uchta muvozanat nuqtasi (saddle point) va bitta beqaror holat mavjud bo'ladi (2-jadval).

1-jadval
 Boshlang'ich holatda kolonna spesifikatsiyasi va jarayon parametrlari

Sirka kislota sarfi, kmol/soat	3.9
Etanol sarfi, kmol/soat	3.0
Moddalar ulushi, mol %	100 (Sirka kislota); 90 (Etanol); 10 (Suv)
Umumiy bosqichlar soni	17
Ajratish bosqichlari soni	0
Reaksiya bosqichlari soni	17
Rektifikatsiya bosqichlari soni	0
Bosim, atm	1
Qaynatgich yuklamasi, kW	63.7
Flegmalar, mol	2.5
Distilyat sarfi, mol	3.25

2-jadval
 1 atm bosimida aralashma uchun azeotrop xususiyati parametrlari

Komponent nomi	Sinflanishi	Temperatura
ETANOL	Muvozanat (egar) nuqtasi	78,31 °C
ETIL ATSETAT	Muvozanat (egar) nuqtasi	77,20 °C
SUV	Muvozanat (egar) nuqtasi	100,02 °C
SIRKA KISLOTA	Barqaror turg'un holat	118,01 °C

Azeotrop holatlar

1-holat:

Komponentlar soni: 2	Temperatura 71,53 °C	
Gomogen	Sinflanishi: Muvozanat (egar) nuqtasi	
	Molyar ulush	Massa ulush
ETANOL	0,4465	0,2967
ETIL ATSETAT	0,5535	0,7033

2-holat:

Komponentlar soni: 3	Temperatura 70,21 °C	
Gomogen	Sinflanishi: Beqaror holat	
	Molyar ulush	Massa ulush
ETANOL	0,1849	0,1402
ETIL ATSETAT	0,5357	0,7769
SUV	0,2793	0,0828

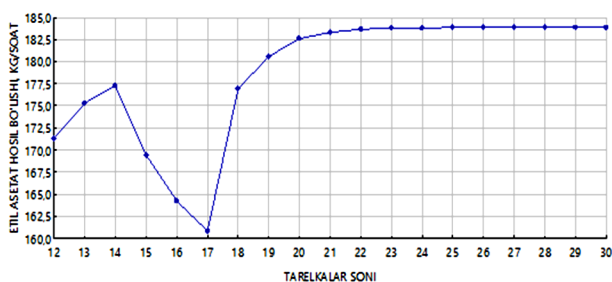
3-holat:

Komponentlar soni: 2	Temperatura 78,12 °C	
Gomogen	Muvozanat (egar) nuqtasi	
	Molyar ulush	Massa ulush
ETANOL	0,8880	0,9530
SUV	0,1120	0,0470

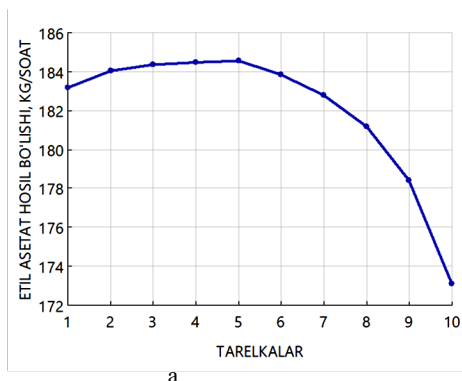
4-holat:

Komponentlar soni: 2	Temperatura 70,73 °C	
Gomogen	Sinflanishi: Muvozanat (egar) nuqtasi	
	Molyar ulush	Massa ulush
ETIL ATSETAT	0,5971	0,8788
SUV	0,4029	0,1212

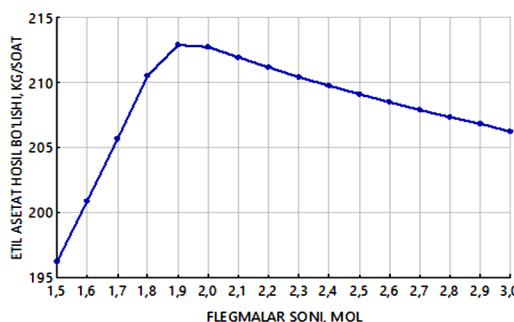
Modellashtirish jarayonida optimal qiymatlarni olish uchun kolonna va xom-ashyo oqimlari parametrlari ta'siri o'rganildi. Ko'rib o'tilayotgan jarayonda boshlang'ich holatda tarelkalar soni 17 ta bo'lib, tarelkalar sonini o'zgartirish orqali reaksiya unumi o'rganildi. Kolonnadagi tarelkalar soni 23 ta bo'lganda eng ko'p miqdorda Etil atsetat hosil bo'lishi kuzatildi (1-rasm) va navbatdagi tarelkalar sonining ortib borishi etil atsetat hosil bo'lishiga sezilarli ta'sir ko'rsatmadi.



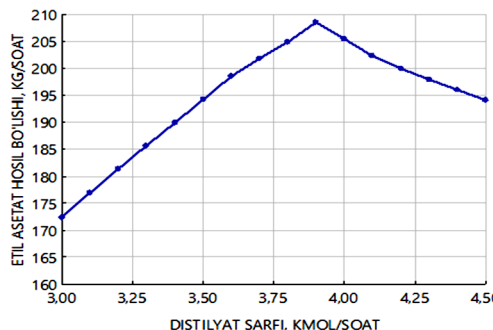
1-rasm. Tarelkalar sonining Etil atsetat hosil bo'lishi miqdoriga ta'siri.



Kolonnada flegmalar soni va distilyat sarfining o'zgarishi nafaqat ajratish jarayoni sifatiga ta'sir etibgina qolmasdan, balki reaksiya qatlamida reaksiya jarayoni borishiga, bu esa o'z navbatida etil atsetat hosil bo'lishiga ham ta'sir etadi. Flegmalar soni va distilyat sarfiga ko'ra reaksiya unumi ham o'zgaradi. Ma'lum bir qiymatgacha reaksiya unumi ortib boradi va eng yuqori qiymatga yetadi. Ko'rib o'tilayotgan reaktiv distillash qurilmasida berilgan reaksiya kinetikalariga [12] ko'ra molyar flegmalar soni 1.9 ga, distilyat sarfi esa 3.9 kmol/soatga yetganida etil atsetat hosil bo'lishi miqdori eng yuqori bo'lar ekan (3,4-rasmlar).

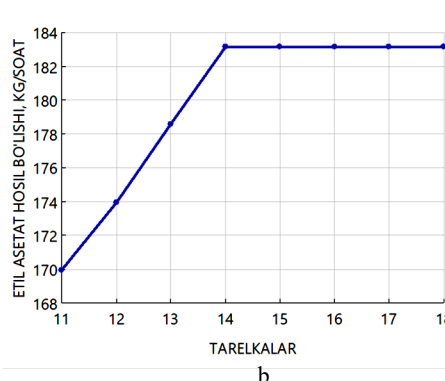


3-rasm. Flegmalar sonining reaksiya unumiga ta'siri.



4-rasm. Distilyat sarfining reaksiya unumiga ta'siri.

Modellashtirish va otimallashtirish natijalariga ko'ra ko'rib o'tilayotgan kimyoviy texnologik jarayon uchun reaktiv distillash kolon-



1-rasm. Tarelkalar sonining Etil atsetat hosil bo'lishi miqdoriga ta'siri.

Material balansi natijalari

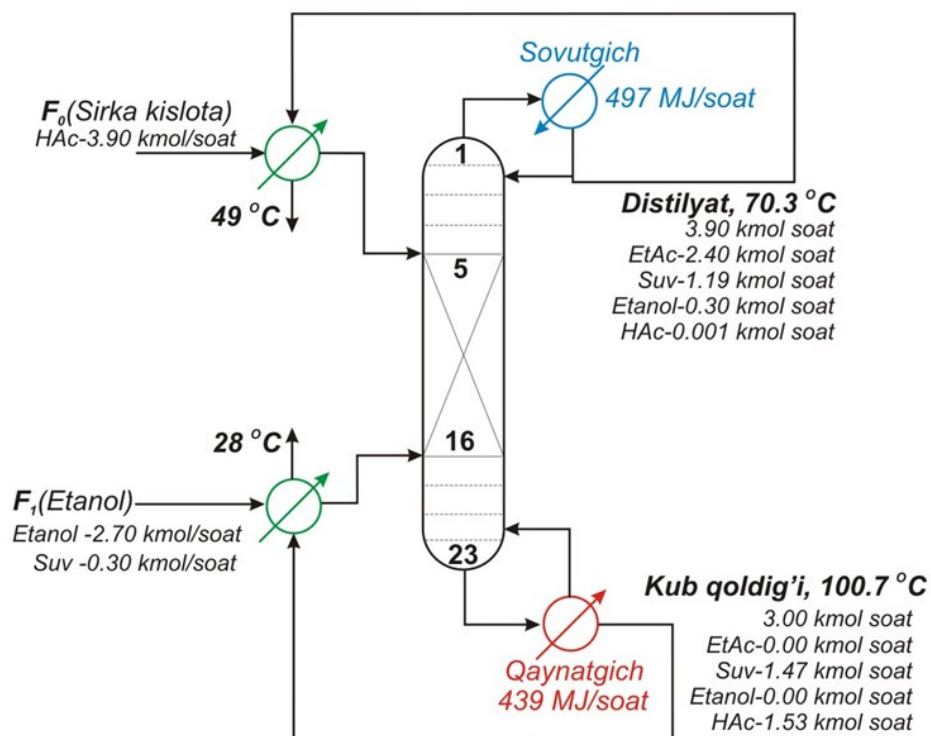
Material	F0 (Sirka kislotasi)	F1 (Etil spirti)	Distilyat sarfi	Kub qoldig'i sarfi
Sarf, kg/soat	234,20	118,32	245,68	129,79
Etil atsetat	0,00	0,00	208,44	0,00
Suv	0,00	26,50	21,52	5,40
Etanol	0,00	0,01	15,39	124,39
Sirka kislotasi	234,20	91,81	0,33	0,00

nasining umumiy tarelkalari soni 23, reaksiya qatlami 5-16 tarelkalar oralig'ida, molyar flegmalar soni 1.9, distilyat sarfi esa 3.9 bo'lganida natija eng optimal qiymatga yetdi. Texnika havfsizligi jihatdan oladigan bo'lsak, kolonna diametri 1.8 metr bo'lganida kolonnaning ko'pirib ketish omili eng kichik bo'lishi aniqlandi. Kolonnaning natijaviy balandligi esa 12.8 metrni tashkil etdi. O'z navbatida sirka kislotasi va etil spirti oqimlarining kirish bosqichlari mos ravishda 5 va 16 bo'lganida ushbu qurilma orqali soatiga 208 kg etil atsetat olishga erishildi (3-jadval). Hosil bo'layotgan barcha Etil atsetat moddasi nisbatan uchuvchan bo'lganligi sababli distilyat sifatida ajratib olindi. Buning uchun reaktiv distillash kolonnasining sovutgichida kondensatsiyalash uchun 497 MJ/soat, isiqlikni ta'minlab beruvchi reboilerda esa 469 MJ/soat energiya sarflanar ekan. Reaktiv distillash kolonnasidan chiqayotgan distilyat va kub qoldig'i oqimlaridagi mavjud issiqlik energiyasini kolon-

naga kirayotgan xom-ashyo oqimlariga integratsiya qilish orqali reboylarga berilayotgan energiya yuklamasi 439 MJ/soat miqdorgacha kamaytirildi. Bu esa o'z navbatida atmosferaga tashlanayotgan uglerod gazlarining ham kamayishiga sabab bo'ladi. Ushbu optimallashtirish natijasiga ko'ra ko'rib o'tilayotgan tizim 5-rasmda tasvirlangan.

Xulosa

Hisoblash natijalari shuni ko'rsatadiki, berilgan qurilmada 208 kg/soat sarf bilan hosil bo'layotgan Etil atsetat moddasining barchasi distilyat sifatida ajratib olinar ekan. Bunda etanolga nisbatan reaksiya unumi 90 foiz atrofida bo'lib, buning uchun sovutish va isitish maqsadida soatiga mos ravishda 497 MJ va 439 MJ energiya sarflandi. Qurilmada umumiy tarelkalari soni 23, reaksiya qatlami 5-16 tarelkalar oralig'ida bo'lib, tozalash va rektifikatsiya uchun jami 11 ta bosqich yetarli bo'ldi.



5-rasm. Etil atsetat ishlab chiqarish uchun reaktiv distillash kolonnasi.

REFERENCES

1. Marino D. J. Ethyl Acetate. *Encyclopedia of Toxicology* (Second Edition), 2005, 277-279.
2. Santaella M., Orjuela A., Narváez P. C. Comparison of different reactive distillation schemes for ethyl acetate production using sustainability indicators. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2015, 96, 1-13.
3. Norkobilov A. *Design of hybrid separation processes incorporating membrane technologies*. PhD Thesis, Universidad de Cantabria, Santander (Spain), 2017.
4. Elmanov A., Bakhtiyorov A., Turakulov Z., Kamolov A., Norkobilov A. Modeling and simulation of hollow fiber modules of hybrid facilitated transport membranes for flue gas CO₂ capture. *Engineering Proceedings*, 37/1, 2023. DOI: 10.3390/ECP2023-14664.
5. Norkobilov A., Turakulov Z., Kamalov A., Talipov H. Pressure-compensated temperature control in rectification column. *Chemistry and chemical engineering*, 2020, 1/11, 52-59.
6. Gorri D., Norkobilov A., Ortiz I. Optimal Production of Ethyl Tert-butyl Ether using Pervaporation-based Hybrid Processes through the Analysis of Process Flowsheet. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2017, 40, 1123-1128.
7. Nicolas K., Javier I., James H., Agnieszka M. R. Photo-/thermal synergies in heterogeneous catalysis: Towards low-temperature (solar-driven) processing for sustainable energy and chemicals. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2021, 296/5, 1-36.
8. Norkobilov A., Maksudov O., Bakhtiyorov A., Zaripov O., Elmanov A. Modelling of reactive distillation process for etherification reaction. *Chemistry and chemical engineering*, 2021, 4/8, 45-50.
9. Sundmacher K., Kienle A. Reactive Distillation. Status and future, in Part II, 4 *Thermodynamics of reactive separation*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2002, 65-93.
10. Kamolov A.B., Turakulov Z.S., Rejabov S.A., Díaz-Sainz G., Gómez-Coma L., Norkobilov A.T., Fallanza M., Irabien A. Decarbonization of Power and Industrial Sectors: The Role of Membrane Processes. *Membranes*, 2023, 13/2, 130-142.
11. Turakulov Z.S., Kamolov A.B., Turakulov A.S., Norkobilov A.T., Fallanza M. Assessment of the Decarbonization Pathways of the Cement Industry in Uzbekistan. *Engineering Proceedings*, 2023, 37/1. DOI: 10.3390/ECP2023-14639.
12. Calvar N., González B., Domínguez A. Esterification of acetic acid with ethanol: Reaction kinetics and operation in a packed bed reactive distillation column. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2007, 46/12, 1317-1323.
13. Aage F., Jones R. L., Prausnitz J. M. Group-contribution estimation of activity coefficients in nonideal liquid mixtures. *AIChE Journal*, 1975, 21/6, 1086-1099.