

Мақала

FTAMP: 50.43.15

БАЯУ КОКСТЕУ ҚОНДЫРҒЫСЫ НЕГІЗГІ РЕКТИФИКАЦИЯЛЫҚ КОЛОННАСЫ ЖҰМЫС РЕЖИМІН БАСҚАРУ БОЙЫНША АЙҚЫН ЕМЕС ОРТАДА ШЕШІМ ҚАБЫЛДАУ ТӘСІЛДЕМЕСІ¹

Бактыгул Асанова ¹, Батырбай Оразбаев ², Жанна Шангитова ³

^{1,3} Х. Досмұхамедов атындағы Атырау университеті, Студенттер дағ. 1, Атырау, Қазақстан

² Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

¹ baha1981_13@mail.ru, ² batyr_o@mail.ru, ³ zhanna.shangitova@mail.ru

Аннотация. Баяу кокстеу қондырғысының негізгі ректификациялық колоннасы мысалында күрделі формализацияланатын, айқынсыздықпен сипатталатын технологиялық нысандардың жұмыс режимдерін басқару бойынша шешім қабылдау есебінің математикалық қойылымы тұжырымдалған. Бұл ректификациялық колоннаның жұмыс сапасын бағалайтын критерийлер мен оларға әсер ететін колоннаның кіріс, режимдік параметрлері және оның өнімдерінің сапа көрсеткіштеріне қойылатын айқын емес шектеулер анықталған. Квазимаксимин және идеалды нүкте оптималдық принциптері комбинациясын айқынсыздыққа модификациялау арқылы айқын емес ортада шешім қабылдау есебі тұжырымдалып, оны шешу үшін эвристикалық тәсіл ұсынылған. Бұл тәсілдеме негізінде бастапқы ақпараттың қолжетімділігі мен өндірісте орын алған жағдайға байланысты басқа оптималдық принциптері мен олардың комбинациясын айқынсыздыққа бейімдеп, шешім қабылдау есептерін тұжырымдауға, оларды шешу эвристикалық тәсілдерін жасақтауға болатыны негізделген. Ұсынылған тәсіл айқынсыздықта өндірістік есептердің тиімді және адекваттығы жоғары шешімдерді қабылдауға мүмкіндік береді. Айқын емес шектеулері бар шешім қабылдау есебін шешуге ұсынылған эвристикалық тәсілі адам-оператор-компьютер арасында ақпарат алмасу арқылы шешімді жақсартуға негізделген итеративті тәсіл болып табылады. Соңғы тиімді шешімді шешім қабылдаушы тұлғамен өндірісте және нысан өндіретін өнімдер нарығындағы жағдайға байланысты қабылданады.

Түйін сөздер: ректификациялау колоннасы, шешім қабылдау, айқын емес шектеулер, оптималдық принциптері, эвристикалық тәсіл.

DOI: <https://doi.org/10.32523/bulmathenu.2024/4.3>

2000 Mathematics Subject Classification: 93C42

1. Кіріспе

Мұнай өңдеу, мұнай химиясы тағы басқа көптеген өндіріс салаларында ректификациялық колонналар түрлі сұйық шикізаттарды қайнау температуралары бойынша түрлі фракцияларға бөлу арқылы өнімдер өндіруде өте маңызды орын алады. Баяу кокстеу қондырғысының (БКҚ) негізгі ректификациялық колоннасы, мұнайды алғашқы өңдеудің алынған гудроннан қосымша

¹Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетімен қаржыландырылған (грант №AP19679897)

мұнай өнімдерін: бензин, жеңіл және ауыр газойльдерін бөлуге арналған. Аталған мұнай өнімдерінен басқа бұл колоннадан өндірісте ішкі отын ретінде қолданатын газ және мұнай коксын өндіру шикізаты өндіріледі (1-суретті қараңыз).

Ректификациялау процесінде қыздыру нәтижесінде жеңіл фракциялар төменгі температураларда, ал ауыр фракциялар жоғары температураларда бөлінеді. Соның нәтижесінде бұл ректификациялық колоннаның жоғары жағынан газ, бензин және жеңіл газойль, ал төменгі жағынан ауыр газойль мен кокс алу үшін кокстеу реакторларына берілетін шикізат бөлінеді.

Ректификациялық колонналарды суару арқылы ректификация процесін жақсартудың белгілі технологиясына қарағанда [1], ректификациялау өнімділігін арттырудың тиімді тәсіліне ректификациялау колонналарының моделі негізінде олардың оптималды жұмыс режимдерін таңдау бойынша шешім қабылдау тәсілі жатады. Сонымен ректификациялау колоннасының жұмыс режимін тиімді басқару үшін колоннаның математикалық модельдерін құрып, олардың негізінде көпкритерийлік жағдайда шешім қабылдау қажет [2]. Бұл есептің күрделілігі, өндірістік жағдайда айқынсыздыққа байланысты арта түседі. Ректификациялық колонналардың математикалық модельдерін құру және олардың жұмыс режимдерін оптимизациялау бойынша жүргізілген зерттеулерді талдау нәтижесін қысқаша келтірейік.

Шикізатты екі фазаға бөлуге арналған қарапайым ректификациялық колонналарды модельдеу және оптимизациялауға арналған көптеген еңбектер, мысалы [3] және тағы басқалары белгілі. Бұл жұмыстарда екі фазалық сұйықтарды бөлуге арналған қарапайым ректификациялық колонналардың математикалық модельдерін құрып, ректификациялау процесін оптимизациялау сұрақтары зерттелген [3, 4] дереккөздерімен қатар басқа зерттеулерде қарапайым ректификациялық колонналардың "тарелкеден тарелкеге" тәсілі негізінде модель құрып, бөлу процесін оптимизациялау сұрақтарын қарастырған. [5, 6] жұмыстарында шикі метанолды ректификациялау процестері мен ректификациялық колонналар жұмысын басқару мен оптимизациялау үшін математикалық модельді қолдану сұрақтары талқыланған. [7] жұмысында ректификациялық қондырғылардың жұмыс режимдерін оптимизациялау мәселелерінің жағдайы талданған. [8] жұмысында еркін таратылымдағы программалар көмегімен қарапайым ректификациялау процестерін модельдеу және оларды тиімді есептеу мен жобалауда қолдануға болатын программалық кешендер мен алгоритмдер қарастырылған.

Талданған және басқа жұмыстарда ректификациялық колонналарды модельдеу үшін "тарелкеден тарелкеге" тәсілдерінің идеялары қолданылған. Бірақ бұл тәсілдер негізінен қарапайым екі фазалық сұйықтарды ректификациялауда тиімді болғанмен, күрделі ректификациялық колонналарда мұнай, мұнай өнімдері сияқты көпфазалық шикізаттарды ректификациялау процесін модельдеуге, оптимизациялауға жарамсыз.

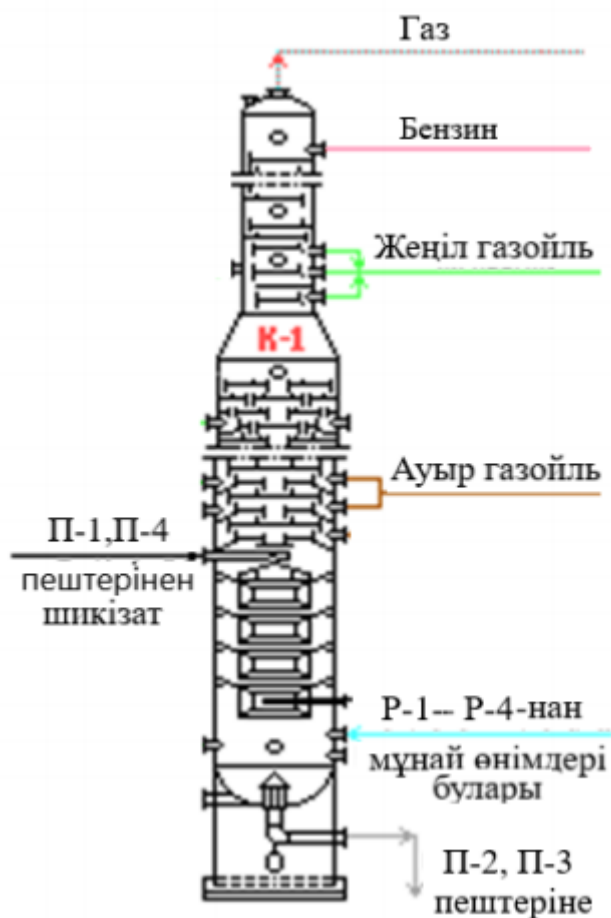
Келесі [9] жұмысында мұнай химиясы тағы басқа өндірістердегі күрделі ректификациялау процестерін модельдеу, оптимизациялау, басқару тәсілдемелері зерттеліп, ұсынылған. Алайда бұл зерттеулерде бастапқы ақпараттың тапшылығы мен айқынсыздығы жағдайында өндірістік ректификациялық колонналарды модельдеу, олардың жұмыс режимдерін оптимизациялау мәселелері қарастырылмаған. Алайда өндірісте БКК негізгі ректификациялық колоннасы сияқты күрделі, шикізатты бірнеше фазаларға бөлуге арналған колонналардың модельдерін құруда және жұмыс режимдерін оптимизациялауға қажетті бастапқы ақпараттың тапшылығы мен айқынсыздығына байланысты мәселелер жиі туындайды. Бұл мәселелер негізінен ректификациялау процесінде шикізат құрамы, өндірілетін өнімдердің сапа көрсеткіштері сияқты кейбір маңызды параметрлер күрделі өлшенеді, немесе өндірістік жағдайда өлшенбейді. Ол параметрлерді өлшеу теориялық тұрғыдан мүмкін болғанның өзінде, практикада оларды өлшеу экономикалық тұрғыдан тиімсіз болуы да мүмкін. Сондықтан ректификациялық колонналардың аталған параметрлері өндірісте шешім қабылдаушы тұлғалар (ШҚТ), эксперт-мамандар көмегімен табиғи тілде айқын емес бағаланады. Мұндай айқынсыздық жағдайда да тәжірибелі ШҚТ, өздерінің білімі, тәжірибесі, интуициясы негізінде айқынсыздықпен сипатталатын С-1 колоннасы сияқты күрделі нысандардың жұмысын тиімді басқара алады. Қазіргі уақытта мұндай күрделі формализацияланатын өндірістік нысандарды

модельдеу мен оптимизациялаудың тиімді және перспективалы бағытына айқын емес жиындар теориясына негізінделген тәсілдерді қолдану болып табылады. Талданған ректификациялық колонналарды модельдеу, оптимизациялау бойынша зерттеу нәтижелері бастапқы ақпараттың айқынсыздығы жағдайында БКҚ С-1 сияқты айқынсыздықпен сипатталатын күрделі ректификациялық колонналардың жұмысын оптимизациялау бойынша зерттеудің өзектілігін негіздейді. Сондықтан бұл ұсынылған жұмыста осы өзекті мәселеге, яғни айқынсыздық жағдайында күрделі, көпфазалық ректификациялау жүретін БКҚ С-1 ректификациялық колоннасы жұмыс режимін модельдері негізінде оптимизациялау мәселелерін зерттеп, шешуге арналған.

2. Әдістер

Бұл жұмыста зерттеу нысаны болып, модельдері негізінде жұмыс режимін басқару бойынша айқынсыздықта шешім қабылдау тәсілдемесі ұсынылатын Атырау мұнай өңдеу зауыты (МӨЗ) БКҚ С-1 негізгі ректификациялық колоннасы алынған. Бұл колоннаның схемасы 1-суретте келтірілген.

Баяу кокстеу қондырғысының (БКҚ) негізгі К-1 ректификациялық колоннасы, П-1, П-4 пештерінде қыздырылған гудрон мен Р-1–Р-4 кокстеу реакторларынан бөлінген мұнай өнімдері буларынан БКҚ қосымша өнімдері: бензин, жеңіл және ауыр газойльдерді бөліп шығарады [10]. Аталған мұнай өнімдерінен басқа К-1 колоннасының жоғары жағынан БКҚ ішкі отыны ретінде қолданатын, газ және төменгі жағынан мұнай коксын өндіру үшін Р-1-Р-4 кокстеу реакторларына, П-2, П-3 пештері арқылы шикізат ретінде берілетін ауыр фракциялары өндіріледі (1-суретті қараңыз). К-1 ректификациялық колоннада өтетін ректификациялау



Сурет 1 – Атырау МӨЗ 21-10/6 БКҚ негізгі ректификациялық колоннасының схемасы

процесі онда берілетін шикізатты (гудрон) түрлі қайнау температураларына байланысты бензин, жеңіл және ауыр газойльдерге бөледі.

Зерттеу жұмысының мақсаты – БКҚ К-1 негізгі ректификациялық колоннасының модельдері негізінде оның жұмыс режимін басқару бойынша айқын емес ортада шешім қабылдау тәсілдемесін ұсыну. Тұжырымдалған зерттеу мақсатына қол жеткізу үшін келесі зерттеу есептері қойылып, шешілетін болады:

- БКҚ С-1 негізгі ректификациялық колоннасының жұмыс режимдерінің сапасын сипаттайтын критерийлер мен оларға әсер ететін колоннаның кіріс, режимдік параметрлерін және оптимизациялау процесінде ескерілуі тиіс шектеулерді анықтау;
- БКҚ С-1 негізгі ректификациялық колоннасының тиімді жұмыс режимін анықтау және шешім қабылдау есебін шешу үшін қолданатын модельдерін құру немесе таңдау;
- модельдері негізінде БКҚ С-1 негізгі ректификациялық колоннасының жұмыс режимін басқару бойынша айқынсыздықта шешім қабылдау есебін формализациялау және математикалық қойылымын тұжырымдау;
- түрлі оптималдық принциптерінің комбинациясын модификациялау арқылы математикалық қойылым тұжырымдалған айқынсыздықта шешім қабылдау есебін шешу үшін эвристикалық тәсілдеме құру.

Зерттеу барысында бұл жұмыста келесідей тәсілдер қолданылады:

- қол жетімді түрлі сипаттағы ақпараттарды қолдану үшін жүйелік талдау тәсілдері пайдаланылады [11],
- статистикалық деректерді жинап, өңдеу үшін эксперименталдық, математикалық-статистикалық тәсілдер [12];
- эксперттік айқын емес ақпаратты жинау, өңдеу және қолдану үшін эксперттік бағалау және айқын емес жиындар теориясы тәсілдері [13, 14, 15, 16, 17] қолданылады.

Айқынсыздықта көпкритерийлі оптимизациялау есебін қою және шешу тәсілдемесі көпкритерийлік оптимизациялау [18, 19] мен түрлі оптималдық принциптеріне [20, 22] негізделеді.

3. Зерттеу нәтижелері

БКҚ С-1 ректификациялық колоннасы сияқты күрделі технологиялық нысандардың жұмыс сапасы әдетте бірнеше критерийлермен бағаланады [19], ол критерийлер Парето, яғни тиімді шешімдер жиынында бір-бірімен қайшылықта болады. Мұндай өндірістік нысандардың жұмыс режимдерін оптимизациялау есептерін шешкенде түрлі шектеулерді және кей ақпараттың айқынсыздығын ескеру қажет [21]. Сондықтан мұндай нысандардың жұмыс режимдерін айқынсыздықта көпкритерийлі оптимизациялау есебін жалпы түрде айқын емес ортада шешім қабылдау есебі ретінде келесідей тұжырымдауға болады [12]:

$$\max_{\mathbf{x} \in X} \mu_C^i(\mathbf{x}), i = \overline{1, m} \quad (1)$$

$$X = \{\mathbf{x} : \mathbf{x} \in \Omega \wedge \varphi(\mathbf{x}) \lesseqgtr b_q, q = \overline{1, L}\} \quad (2)$$

мұндағы $\mu_C^i(\mathbf{x}), \overline{1, m}$ – колоннаның жұмыс сапасын бағалайтын нормалданған локальды критерийлер; $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ колоннаның кіріс, режимдік параметрлері; X – қабылданатын шешімдердің анықталу облысы; Ω – кіріс, режимдік параметрлер мен шектеулерді бастапқы альтернативалар жиыны; $\wedge$ – логикалық және белгісі, ол арқылы байланысқан талаптар орындалуы тиіс; $\varphi(\mathbf{x}) \lesseqgtr b_q$ – айқын емес шектеулер. Критерийлер мен шектеулердің мәні кіріс, режимдік параметрлерге байланысты. Сонда шешім қабылдау есебін шешу нәтижесінде критерийлердің максималды мәндерін қамтамасыз ететін және айқын емес шектеулердің талаптарын толықтай қанағаттандыратын $\mathbf{x}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ векторын анықтау қажет [5, 22].

Жоғарыда келтірілген шешім қабылдау есебін БКҚ С-1 ректификациялық колоннасының жұмыс режимін басқаруда шешім қабылдау есебіне нақтыланған [12]:

$$\max_{(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \in X} \mu_C^i(\mathbf{x}_1), i = \overline{1, 4} \quad (3)$$

$$X = \{(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \in \Omega : \varphi(\mathbf{x}_2) \lesseqgtr b_q, q = \overline{1, 3}\}. \quad (4)$$

(3)-(4) шешім қабылдау есебінде $\mu_C^i(\mathbf{x}_1), i = \overline{1, 4}$ – локалды критерийлер - колоннадан өндірілетін өнімдер көлемі, сәйкесінше, $\mu_C^1(\mathbf{x}_1)$ – бензин көлемі, $\mu_C^2(\mathbf{x}_1)$ – жеңіл газойль көлемі, $\mu_C^3(\mathbf{x}_1)$ – ауыр газойль көлемі, $\mu_C^4(\mathbf{x}_1)$ – кокс өндіру үшін кокстеу реакторларына берілетін шикізат көлемі; $\varphi(\mathbf{x}_2) \lesseqgtr b_q, q = \overline{1, 3}$ – өндірілетін негізгі мұнай өнімдері – бензин, жеңіл және ауыр газойльдердің сапа көрсеткіштеріне қойылған айқын емес шектеулер; $\mathbf{x}_1 = (x_1, x_2, x_3)$ – бензин жеңіл газойль, ауыр газойль және кокс өндірілетін шикізат көлемдеріне әсер ететін параметрлер векторы; $\mathbf{x}_2 = (x_4, x_5)$ – бензин, жеңіл газойль және ауыр газойль сапа көрсеткіштеріне әсер ететін параметрлер векторы. Бұл векторлар компоненттері С-1 колоннасының келесі параметрлері болып табылады: x_1 – колонна кірісіндегі шикізат (гудрон) көлемі; x_2 – колонна температурасы; x_3 – колоннадағы қысым; x_4 – өнімдерді шығару температурасы; x_5 – өнімдерді шығару қысымы [23].

Сонда (3)-(4) шешім қабылдау есебінің шешімі айқын емес шектеулердің талаптарын орындай отырып, локалды критерийлердің оптималды мәндерін қамтамасыз ететін $\mathbf{x}_1^* = (x_1^*, x_2^*, x_3^*)$ және $\mathbf{x}_2^* = (x_4^*, x_5^*)$ векторларының мәндері болып табылады.

Осы мақалаға негіз болған ғылыми жобаны орындау барысында БКҚ негізгі С-1 ректификациялық колоннасының шығысындағы өнімдер, яғни бензин, жеңіл, ауыр газойльдер мен мазут көлемін анықтайтын параметрлік идентификациялаудан кейін келесідей сызықтық емес регрессиялық модельдер түрінде алынған:

1. Колоннаның кіріс, режимдік параметрлері x_1, x_2, x_3 мәндеріне байланысты бензин көлемін анықтау моделі:

$$y_1 = \mu_C^1(\mathbf{x}_1) = 3.34 + 0.011578947x_1 + 0.011x_2 - 0.00012884x_3 + 0.000121884x_1^2 + 0.00001375x_2^2 + 0.0027160494x_3^2. \quad (5)$$

2. Колонна шығысындағы жеңіл газойль көлемін анықтау моделі:

$$y_2 = \mu_C^2(\mathbf{x}_1) = 18.58 + 0.036842105x_1 + 0.028x_2 - 1.555555556x_3 + 0.000387812x_1^2 + 0.000028x_2^2 + 0.086419753x_3^2 \quad (6)$$

3. Колонна шығысындағы ауыр газойль көлемін анықтау моделі:

$$y_3 = \mu_C^3(\mathbf{x}_1) = 11.55 + 0.026315789x_1 + 0.111111111x_2 - 1.000277008x_3 + 0.000277008x_1^2 + 0.000012207x_2^2 + 0.061728395x_3^2. \quad (7)$$

4. С-1 колоннасы төменгі жағынан кокстеу реакторларына берілетін ауыр фракциялар көлемін анықтау моделі:

$$y_4 = \mu_C^4(\mathbf{x}_1) = 19.33 + 0.035789474x_1 + 0.017894737x_2 - 1.411111111x_3 + 0.000376731x_1^2 + 0.000011773x_2^2 + 0.083950617x_3^2. \quad (8)$$

БКҚ С-1 колоннасынан тауарлық өнімдер ретінде өндірілетін бензин, жеңіл және ауыр газойльдің негізгі сапа көрсеткіштеріне x_4 – өнімдерді шығару температурасы мен x_5 – өнімдерді шығару қысымы әсер етеді [24]. Бензин, жеңіл және ауыр газойльдерің негізгі сапа көрсеткіштері олардың бастапқы қайнау температуралары болып табылады. Аталған сапа көрсеткіштері стандарт бойынша көрсетілген шамадан "артық емес – $\lesseqgtr$ " деген айқын емес шектеулер ретінде ескеріледі. Бұл айқын емес шектеулердің өнімдерді шығару температурасы мен қысымынан байланысты келесідей айқын емес теңсіздіктер түрінде анықталған [25]:

1. Бензинді шығару температурасы x_4 мен С-1 колоннасы қысымы x_5 мәндеріне байланысты бензиннің бастапқы қайнау температурасын сипаттайтын айқын емес шектеу:

$$\mu_1(\mathbf{x}_2) = 27.5 + 0.0275x_4 + 3.666666667x_5 + 0.0001375x_4^2 \lesssim 55^0C. \quad (9)$$

2. Жеңіл газойльді шығару температурасы x_4 мен С-1 колоннасы қысымы x_5 мәндеріне байланысты жеңіл газойльдің бастапқы қайнау температурасын сипаттайтын айқын емес шектеу:

$$\mu_2(\mathbf{x}_2) = 87.5 + 0.0546875x_4 + 11.666666667x_5 + 0.000170898x_4^2 \lesssim 175^0C. \quad (10)$$

3. Жеңіл газойльді шығару температурасы x_4 мен С-1 колоннасы қысымы x_5 мәндеріне байланысты жеңіл газойльдің бастапқы қайнау температурасын сипаттайтын айқын емес шектеу [26]:

$$\mu_3(\mathbf{x}_2) = 97.5 + 0.0734375x_4 + 15.666666667x_5 + 0.000229492x_4^2 \lesssim 235^0C. \quad (11)$$

Ғылыми жобаны орындау барысында алынған (5) - (11) өрнектері негізінде жоғарыда қойылған (3) - (4) есебін түрлі оптималдық принциптерін мен олардың комбинациясын айқынсыздықта модификациялау арқылы түрлі айқын емес ортада шешім қабылдау есептерін алып, оларды шешу тәсілдерін құруға болады [27].

Мысалы өндірісте нысандардың тиімді жұмыс режимдерін таңдау бойынша шешім қабылдауда кейбір принциптердің белгілі бір ымырамен орындалғаны жеткілікті болады. Мұндай жағдайда бірнеше айқын емес шектеулі шешім қабылдау есептерін квазимаксимин (жуықша максимин) мен идеалды нүкте принциптері комбинациясын айқынсыздықта тұжырымдауға болады:

$$\max_{(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \in X} \mu_0^1(\mathbf{x}_1) \quad (12)$$

$$X = \{(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \in \Omega : \mathbf{x}_1 = \arg \max_{i \in I_0} \min(\gamma_i \mu_0^i(t_1, t_2, t_3) - \Delta_i), \mu_q(\mathbf{x}_2) \geq \min \|\mu_q(t_4, t_5) - \mu^u\|_D,$$

$$I_0 = \{2, \dots, m\}, q = \overline{1, L}\} \quad (13)$$

мұндағы $\mu_0^i(\mathbf{x}_1)$ – максимизацияланатын ең маңызды, басты критерий; $\gamma_i, i = \{2, \dots, m\}$ – ШҚТ тағайындайтын басқа критерийлердің салмақ коэффициенттері; $\mu_C^i(\mathbf{x}_1), i = \{2, \dots, m\}$ – ескерілуі тиіс басқа локалды критерийлер; $\Delta_i, i = \overline{2, m}$ локалды критерийлердің өз ара ымыралары; $\mu_q(\mathbf{x}_2), q = \overline{1, L}$ – айқын емес шектеулердің орындалу деңгейлерін сипаттайтын тиістілік функциялар; μ^u – айқын емес шектеулердің идеалды мәндері, егер $\mu_q(\mathbf{x}_2), q = \overline{1, L}$, нормалды, яғни максималды мәні 1 болса, онда $\mu^u = 1, \|\mu_q(x) - \mu^u\|_D - D$ кеңістігінде айқын емес шектеулер мен олардың идеалды мәндері арасындағы қашықтықты минимизациялайтын метрика; $I_0 = \{2, \dots, m\}$ – шектеулер құрамында ескерілетін критерийлердің индекстері жиыны.

(12)-(13) айқын емес ортада шешім қабылдау есебінде ең маңызды $\mu_0^1(\mathbf{x}_1)$ критерий максимизацияланады, ал басқа критерийлер квазимаксимин (КММ) принципі бойынша, яғни $\Delta_i, i = \overline{2, m}$ концессияларын ескере отырып шектеулер құрамына ендіріледі, ал айқын емес шектеулер модификацияланған идеалды нүкте (ИН) негізінде есептеледі.

Айқын емес ортада шешім қабылдау есебінің жоғарыда алынған (12)-(13) қойылымы мен оны шешу тәсілі квазимаксимин және идеалды нүкте принциптерінің комбинациясын қолдануға негізделгендіктен, бұл қойылым критерийлердің кепілдемелік мәндері қажет болғанда және шектеулердің идеалды (қалаулы) мәндері белгілі болғанда тиімді қолданылады.

Айқын емес жиындар теориясы негізінде және КММ мен ИН тәсілі идеяларын модификациялау арқылы тұжырымдалған (12)-(13) шешім қабылдау есебін шешу үшін, төмендегі негізгі пунктерден тұратын, келесі КММ+ИН эвристикалық тәсілі ұсынылады.

КММ+ИН эвристикалық тәсілі:

1. ШҚТ ең маңызды критерийге 1-ші басымдық беріп, барлық локалды критерийлерді басымдық бойынша реттеп, $\mu_0^i(\mathbf{x}_1), i = \overline{1, m}$ локалды критерийлердің маңыздылық коэффициенттерін тағайындайды: $\gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_m), \sum_{i=1}^m \gamma_i = 1, \gamma_i \geq 0, i = \overline{1, m}$
2. Әр i -ші координат бойынша қадамдар саны ендіріледі: $p_i, i = \overline{1, m}$
3. $h_i = \frac{1}{p_i}, i = \overline{1, m}$ - формуласы бойынша салмақ векторы γ координаттарын өзгерту үшін қадамдар саны анықталады.
4. $[0, 1]$ аралығында $h_i, i = \overline{1, m}$ қадамымен координаттарды өзгерте отырып салмақ векторлары жиынтығын $\gamma^1, \gamma^2, \dots, \gamma^N, N = (p_1 + 1)(p_2 + 1) \dots (p_m + 1)$ құру.
5. ШҚТ 2-критерийден бастап барлық локалды критерийлерге концессия (уступки) $\Delta_i, i = \overline{2, m}$ мәндерін анықтайды.
6. Егер критерийлер мен $\Delta_i, i = \overline{2, m}$ айқын емес болса, онда оларды сипаттайтын үшін терм-жиындар анықталып, әр термге тиістілік функциялар тұрғызылады.
7. Айқын емес шектеулерді сипаттайтын терм-жиыны анықталып, олардың орындалуын бағалайтын тиістілік функциялары тұрғызылады: $\mu_q(\mathbf{x}_2), q = \overline{1, L}$.
8. Идеалды нүкте координаттары анықталады. Бұл нүктелер координаттары ретінде алдыңғы пунктте тұрғызылған шектеулердің орындалу тиістілік функцияларының максималды мәндерін $\overline{\mu^u} = (\max \mu_1(\mathbf{x}_2), \dots, \max \mu_L(\mathbf{x}_2))$ қабылданады. Егер тиістілік функциялары нормалды болса, онда μ^u координаттары бірліктер болады, яғни: $\overline{\mu^u} = (1, \dots, 1)$.
9. Құрылған айқын емес шектеулер тиістілік функциялары $\mu_q(\mathbf{x}_2)$ мен нақтыланған идеалды нүкте μ^u ара қашықтығын анықтайтын метрика түрі $\|\mu_q(\mathbf{x}_2) - \mu^u\|_D, q = \overline{1, L}$ анықталады. Бұл пункте Евклидтік метрикуаны $\|(\mu_1(\mathbf{x}_2), \dots, \mu_L(\mathbf{x}_2)) - \overline{\mu^u}\|_E^2$ алу ұсынылады.
10. X' (13) анықталу облысында ең маңызды, басымдық бірінші, критерийдің $\mu_0^1(\mathbf{x}_1(\gamma, \Delta))$, басқа локалды критерийлердің $\mu_0^i(\mathbf{x}_1(\gamma, \Delta)), i = \{2, \dots, m\}$ және айқын емес шектеулердің орындалу деңгейлерін сипаттайтын тиістілік функциялардың $\mu_1(\mathbf{x}_2(\|\cdot\|_D)), \dots, \mu_L(\mathbf{x}_2(\|\cdot\|_D))$ максималды мәндерін қамтамасыз ететін $\mathbf{x}_1(\gamma, \Delta), \mathbf{x}_2(\|\cdot\|_D)$ ағымдағы шешімдерді анықтау.
11. Алдыңғы пунктте алынған ағымдағы шешімдер ШҚТ-ға ұсынылады. Егер бұл ағымдағы шешімдер ШҚТ-ны қанағаттандырмаса, онда ол γ, Δ және/немесе $\|\cdot\|_D$ мәндерін өзгертеді. Содан кейін шешімдерді жақсарту итерациясы 10-шы пункттен, алынған шешімдер ШҚТ-ны қанағаттандырғанша қайталанады. Анықталған ағымдағы шешімдерге ШҚТ қанағаттанса, келесі 12-ші пунктке өту.
12. ШҚТ қабылдаған соңғы ең жақсы келесі шешімдер шығарылады: $\mu_0^1(\mathbf{x}_1^*(\gamma, \Delta_i)), \mu_0^i(\mathbf{x}_1^*(\gamma, \Delta)), i = \{2, \dots, m\}$ – ең маңызды бірінші критерий мен қалған локалды критерийлердің концессиясын ескергендегі максималды мәндері мен $\mu_1(\mathbf{x}_2^*(\|\cdot\|_D)), \dots, \mu_L(\mathbf{x}_2^*(\|\cdot\|_D))$ – айқын емес шектеулердің орындалуын бағалайтын тиістілік функциялардың максималды мәндерін қамтамасыз ететін, $\mathbf{x}_1^*(\gamma, \Delta_i), \mathbf{x}_2^*(\|\cdot\|_D)$ – кіріс, режимдік параметрлері векторларының оптималды мәндері.

Көпкритерийлі және айқын емес ортада шешім қабылдаудың ұсынылған эвристикалық тәсілі квазимаксимин және идеалды нүкте модификацияланған принциптерінің комбинациясын қолдануға негізделгендіктен, критерийлердің кепілдемелік мәндері қажет болғанда және шектеулердің идеалды (қалаулы) мәндері белгілі болғанда қолданған тиімді болып табылады.

4. Нәтижелер мен талқылау

Бұл зерттеуде БКҚ негізгі ректификациялық колоннасы мысалында айқынсыздықпен сипатталатын күрделі технологиялық нысандардың жұмыс режимдерін басқару бойынша

айқынсыздықта шешім қабылдау есебі тұжырымдалған. Айқынсыздықпен сипатталатын шешім қабылдау есептері, қолжетімді ақпараттар түріне байланысты түрлі оптималдық принциптері комбинациясын модификациялау арқылы тұжырымдалуы және оларды шешудің эвристикалық тәсілдері құрылуы мүмкін екені негізделген. Детерминдік жағайларында белгілі оптималдық принциптерін айқынсыздыққа бейімдеу үшін, айқын критерийлер $[0, 1]$ интервалында өзгертіндей болып нормалданған. Ал айқын емес шектеулер олардың орындалу деңгейін сипаттайтын тиістілік функциялары арқылы сипатталады.

Айқынсыздықта шешім қабылдау есебінің (12)-(13) математикалық қойылымы квазимаксимин принципін критерийлерге, ал идеалды нүкте принципін айқын емес шектеулерге модификациялау негізінде тұжырымдалған. Бұл есепті зерттеу нысаны, яғни БКҚ С-1 ректификациялық колоннасы жұмыс режимін басқаруда шешім қабылдау есебіне бейімдеу үшін, критерийлер саны $m=4$, ал айқын емес шектеулер саны $L=3$ деп алу қажет. БКҚ С-1 ректификациялық колоннасы жұмыс режимін басқару бойынша шешім қабылдауда критерийлер жоғарыда келтірілген (5)-(8), ал айқын емес шектеулер (9)-(11) өрнектерімен анықталатын болады.

Айқын емес ортада шешім қабылдау есебін шешу үшін ұсынылған КММ+ИН эвристикалық тәсілі ШҚТ тәжірибесін, білімін, интуициясын және компьютердің мүмкіндігін яғни адам мен компьютердің артықшылықтарын қолдануға негізделген итерациондық тәсіл болып табылады. Құрылған тәсілдің 10-пунктінде оптималдық принциптері айқынсыздыққа модификациялау арқылы алынып, тиістілік функциялар арқылы формализацияланған біркритерийлік есебін ары қарай компьютерде шартты оптимизациялаудың белгілі тәсілдерімен шешуге болады. Шешім қабылдау процесі ШҚТ мен компьютер арасында диалогты режимде итерациялық жолмен орындалады.

Бастапқы қажетті ақпараттың қолжетімділігі және өндірісте туындаған жағдайға байланысты ұсынылған тәсілдеме негізінде шешім қабылдау есептерін басқа оптималдық принциптерін модификациялау арқылы шешім қабылдау есептерін қойып, оларды шешу эвристикалық тәсілдерін құруға болады.

5. Қорытынды

Бұл жұмыста БКҚ С-1 ректификациялық колоннасы мысалында айқынсыздықпен сипатталатын өндірістік нысандардың жұмыс режимдерін басқару бойынша шешім қабылдау есебінің математикалық қойылымы тұжырымдалған. Математикалық қойылымы алынған айқынсыздықта шешім қабылдау есебін шешу үшін квазимаксимин және идеалды нүкте оптималдық принциптері комбинациясын модификациялау арқылы алынған эвристикалық тәсілі ұсынылып, сипатталған.

Зерттеу барысында алынған нәтижелер бойынша келесідей негізгі қорытындылар жасауға болады:

1. Зерттеу нысаны ретінде алынған БКҚ С-1 негізгі ректификациялық колоннасының жұмыс режимдерінің сапасын сипаттайтын критерийлер мен оларға әсер ететін нысанның кіріс, режимдік параметрлерін және оптимизациялау процесінде ескерілуі тиіс шектеулер анықталды;
2. Зерттеу нысанының тиімді жұмыс режимін анықтау және шешім қабылдау есебін шешу үшін қолданатын математикалық модельдер келтірілген;
3. БКҚ С-1 негізгі ректификациялық колоннасының жұмыс режимін басқару бойынша айқынсыздықта шешім қабылдау есебі формализацияланып, математикалық қойылымы тұжырымдалды;
4. Квазимаксимин және идеалды нүкте оптималдық принциптерінің комбинациясын модификациялау арқылы математикалық қойылымы тұжырымдалған шешім қабылдау есебін айқынсыздықта шешу үшін эвристикалық тәсілдеме ұсынылып, сипатталды.

Авторлардың қосқан үлесі:

Асанова Б.У. – БКҚ С-1 ректификациялық колоннасы мысалында айқынсыздықпен сипатталатын өндірістік нысандардың жұмыс режимдерін басқару бойынша шешім қабылдау есебінің математикалық қойылымы тұжырымдалды.

Оразбаев Б.Б. – Математикалық қойылымы алынған айқынсыздықта шешім қабылдау есебін шешу үшін квазимаксимин және идеалды нүкте оптималдық принциптері комбинациясын модификациялау арқылы алынған эвристикалық тәсілі ұсынылып, сипатталды. Квазимаксимин және идеалды нүкте оптималдық принциптерінің комбинациясын модификациялау арқылы математикалық қойылымы тұжырымдалған шешім қабылдау есебін айқынсыздықта шешу үшін эвристикалық тәсілдеме ұсынылып, сипатталды.

Шангитова Ж.Е. – Зерттеу нысанының тиімді жұмыс режимін анықтау және шешім қабылдау есебін шешу үшін қолданатын математикалық модельдері келтірілді. Мақаланы рәсімдеді.

Әдебиеттер тізімі

- 1 Borodin E.V., Lavrova A.S., Golovachev V.A., Petin A.A., Demin A.M., Kleymenov A.V., Vedernikov O.S. Modeling of the Process of Rectification of Delayed Coking Products in the Production of Petroleum Cokes. *OilGas-Chemistry*, 2023. Vol. 37. N. 2. P. 20-26. <https://doi.org/10.24412/2310-8266-2023-2-20-26>.
- 2 Assanova B., Orazbayev B., Shangitova Zh., Moldasheva Zh., Orazbayeva K. Development of Coke Chambers Models of Delayed Coking Unit under uncertain initial. *International Symposium on Innovative Approaches in Smart Technologies*. Ankara, Turkey, 2023. P. 1-7.
- 3 Anisimov I.V., Bodrov V.I., Pokrovsky V.B. Mathematical modeling and optimization of distillation units. *Chemistry*, 2017. 3rd ed. 225 p.
- 4 Palancz B. Mathematical Models for Rectification Processes. *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, 2022. Vol.27. N. 1. P. 247–270.
- 5 Duyfjes G., Grinten P.M. Application of a mathematical model for the control and optimization of a distillation plant. *Automatica*, 2019. Vol. 9. N. 5. P. 537-547. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(73\)90040-X](https://doi.org/10.1016/0005-1098(73)90040-X).
- 6 Khazeev A.A., Cherepanova M.V. Mathematical Modeling of the Basic Rectification of the Methanol-Raw. *Perm National Research Polytechnic University: Chemical Technology and Biotechnology*, 2022. N. 2. P. 23–42.
- 7 Savelyev M.Yu. Optimization of the operation of a rectification plant: review of the state of the issue. *Bulletin of Omsk State Technical University*, 2022. Vol. 330. N. 7. P. 25–28.
- 8 Anikin A.V. Modeling the rectification process using freely available software. *Trends in the development of science and education*, 2019. Vol. 48. N. 6. P. 55–58. DOI: 10.18411/lj-03-2019-129.
- 9 Shakeri Z, Benfriha Kh., Shirinbayan M., Ahmadi M., Tcharkhtchi A. Mathematical Modeling and Optimization of Fused Filament Fabrication (FFF) Process Parameters for Shape Deviation Control of Polyamide 6 Using Taguchi Method. *Polymers*, 2021. Vol. 13. N. 21. P.36-57. <https://doi.org/10.3390/polym13213697>
- 10 Тулеуов Ж.Н., Сулейменов Д. Технологические регламенты для установки замедленного коксования АНПЗ ДСУ 21–10/6. Атырау: Атырауский Университет Нефти и Газа, 2018. 217 стр.
- 11 Pavlov, S.Yu., Kulov, N.N., Kerimov, R.M. Improvement of Chemical Engineering Processes Using Systems Analysis. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2019. Vol. 53. N. 2. P. 117–133.
- 12 Assanova B., Orazbayev B., Moldasheva Zh., Makhatova V., Tuleuova R. A fuzzy decision-making method for controlling operation modes of a hard-to-formalise rectification column of a delayed coking unit. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, 2024. Vol 1. N. 463. P. 17-30.
- 13 Bochkarev V.V. Optimization of chemical technological processes. Publishing House Yurayt, 2017. 337 p.
- 14 Гуцыкова С. Метод экспертных оценок. Теория и практика. М.: Издательский дом РАН, 2011. 278 стр. ISBN: 978-5-9270-0209-2.
- 15 Jorgensen, M. A Review of Studies on Expert Estimation of Software Development Effort. *Journal of Systems and Software*, 2019. V.70. P. 37-60.
- 16 Рыжов А.П. Элементы теории нечетких множеств и ее приложений. М.: Московский Государственный Университет, 2017. 278 стр. ISBN: 978-3-540-70777-6.
- 17 Zimmermann H.J. Fuzzy Set Theory and Its Applications. Springer Science+Business Media, 2018. 525 p. ISBN: 978-94-010-3870-6.
- 18 Volin Yu.M., Ostrovsky G.M. Multicriteria optimization of technological processes in conditions of uncertainty. *Automation and Remote Control*, 2017. Vol. 53. N. 3. P. 165–178.
- 19 Kahraman C. Fuzzy Multi-Criteria Decision Making. Theories and Applications with Recent Developments, 2018. P. 592–608.
- 20 Ostrovsky G.M., Ziyatdinov N.N., Lapteva T.V., Silvestrova A. Optimization of Chemical Process Design with Chance Constraints by an Iterative Partitioning Approach. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2019. Vol. 54. N. 13. P. 3412–3437.

- 21 Dieter M.I., Pfenninger S. Introduction to Systems Analysis. Mathematically Modeling Natural Systems. Springer Link. 2018. 267 p. ISBN : 978-3-642-30638-9.
- 22 Ibrahim D., Jobson M., Li J., Guillen-Gosalbez G. Optimization-based design of crude oil distillation units using surrogate column models and a support vector machine. Chemical engineering research & design, 2018. Vol. 134. P. 212–225.
- 23 Карманов Ф.И., Острейковский В.А. Статистические методы обработки экспериментальных данных М.: Радио и коммуникации, 2019. 187 стр. ISBN: 978-5-905554-96-4.
- 24 Radin B.A. Beyond Machiavelli: policy analysis comes of age. Washington: Georgetown University Press, 2017. 378 p. ISBN 0878407731.
- 25 Sheikus A., Kovalenko V., Kotok V., Levchuk I., Darovskih L. Optimization of Rectification Process Using Mobile Control Action with Account for Criterion of Maximizing Separation Quality. EUREKA: Physics and Engineering, 2020. Vol. 17. N. 6. P. 33–40. DOI: 10.21303/2461-4262.2020.00150
- 26 Melnikova I.V., Sakulina V.P. Math statistics. Graduate School, 2022. 132 p. ISBN 978-5-7638-4595-2.
- 27 Nadir N., Ziyatdinov D., Emelyanov I., Ryzhova A., Chernakov P. Algorithm and software for the optimal technological design of a system of simple distillation columns. Fine Chemical Technologies, 2021. Vol. 16. N. 5. P. 379–389. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-5-379-389>.

ПОДХОД К ПРИНЯТИЮ РЕШЕНИЙ В НЕЧЕТКОЙ СРЕДЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ РАБОТЫ ОСНОВНОЙ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ УСТАНОВКИ ЗАМЕДЛЕННОГО КОКСОВАНИЯ

Бактыгул Асанова¹, Батырбай Оразбаев², Жанна Шангитова³

^{1,3} Атырауский университет им. Х.Досмухамедова, Атырау, Казахстан

² Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Аннотация. На примере основной ректификационной колонны установки замедленного коксования сформулирована математическая постановка задачи принятия решений по управлению режимами работы трудноформализуемых технологических объектов, характеризующиеся нечеткостью. Определены критерии оценки качества работы данной ректификационной колонны и влияющие на качества входные параметры, режимные параметры колонны, а также нечеткие ограничения на качественные показатели ее продукции. На основе модификации комбинации принципов оптимальности квазимономина и идеальной точки для нечеткости сформулирована задача принятия решений в нечеткой среде и разработан эвристический метод ее решения. Обосновано, что в зависимости от исходной информации и сложившейся ситуации на производстве и рынке можно адаптировать комбинации других принципов оптимальности и сформулировать задачи принятия решений в нечеткой среде и разработать эвристические методы их решения. Предлагаемый эвристический подход к решению задачи принятия решений в нечеткой среде в отличие от известных методов решения нечетких задач, позволяет максимально использовать собранную нечеткую информацию. В известных методах решения нечетких задач в процессе преобразования нечетких задач к набору четких задач теряется часть исходной нечеткой информации, что снижает адекватность решения. Предложенный подход позволяет сформулировать и решать нечеткую задачу в нечеткой среде путем формализации нечеткости в виде функции принадлежности. Таким образом, за счет максимального использования исходной нечеткой информации, представляющей собой опыт, знания и интуицию лица, принимающего решения и экспертов обеспечивает принятия эффективных и высокоадекватных решений в нечеткой среде. Предлагаемый эвристический метод решения задачи принятия решений с нечеткими ограничениями представляет собой итерационный метод, основанный на улучшении решения путем обмена информацией между человеком-оператором и компьютером. Окончательное наилучшее решение принимается лицом, принимающим решение в зависимости от сложившейся ситуации на производстве и рынке производимой продукции предприятием.

Ключевые слова: ректификационная колонна, принятие решений, нечеткие ограничения, принципы оптимальности, эвристический метод.

Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰҰ хабаршысы. Математика, компьютерлік ғылымдар, механика сериясы, 2024, Том 149, №4
Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева. Серия Математика, компьютерные науки, механика, 2024, Том 149, №4

AN APPROACH TO DECISION MAKING IN A FUZZY ENVIRONMENT TO CONTROL THE OPERATING MODE OF THE MAIN RECTIFICATION COLUMN OF A DELAY COKING UNIT

Baktygul Assanova¹, Batyrbai Orazbayev², Zhanna Shangitova³

^{1,3} Kh. Dosmukhamedov Atyrau University, Studenchesky ave. 1, Atyrau, Kazakhstan

² L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Abstract. Based on the example of the main distillation column of a delayed coking unit, a mathematical formulation of the problem of decision-making to control the operating modes of complex technological objects characterized by vagueness. The criteria for assessing the quality of operation of this distillation column and the input parameters affecting the quality, operating parameters of the column, as well as unclear restrictions on the quality indicators of its products have been determined. The criteria for assessing the quality of operation of this distillation column and the input parameters affecting the quality, operating parameters of the column, as well as unclear restrictions on the quality indicators of its products have been determined. It is substantiated that, depending on the initial information and the current situation in production and the market, it is possible to adapt combinations of other optimality principles and formulate decision-making problems in a fuzzy environment and develop heuristic methods for solving them. The proposed heuristic approach to solving the problem of decision making in a fuzzy environment, in contrast to known methods for solving fuzzy problems, allows for maximum use of the collected fuzzy information. In known methods for solving fuzzy problems, in the process of transforming fuzzy problems into a set of clear problems, part of the original fuzzy information is lost, which reduces the adequacy of the solution. The proposed approach allows us to formulate and solve a fuzzy problem in a fuzzy environment by formalizing the fuzziness in the form of a membership function. Thus, due to the maximum use of initial fuzzy information, which represents the experience, knowledge and intuition of the decision maker and experts, it ensures the adoption of effective and highly adequate decisions in a fuzzy environment. The proposed heuristic method for solving a decision-making problem with fuzzy constraints is an iterative method based on improving the solution by exchanging information between a human operator and a computer. The final best decision is made by the decision maker depending on the current situation in production and the market for the products manufactured by the enterprise.

Keywords: distillation column, decision making, fuzzy constraints, principles of optimality, heuristic method.

Әдебиеттер тізімі

- 1 Borodin E.V., Lavrova A.S., Golovachev V.A., Petin A.A., Demin A.M., Kleymenov A.V., Vedernikov O.S. Modeling of the Process of Rectification of Delayed Coking Products in the Production of Petroleum Cokes. *OilGas-Chemistry*, 2023. Vol. 37. N. 2. P. 20-26. <https://doi.org/10.24412/2310-8266-2023-2-20-26>.
- 2 Assanova B., Orazbayev B., Shangitova Zh., Moldasheva Zh., Orazbayeva K. Development of Coke Chambers Models of Delayed Coking Unit under uncertain initial. *International Symposium on Innovative Approaches in Smart Technologies*, Ankara, Turkey. 2023. P. 1-7.
- 3 Anisimov I.V., Bodrov V.I., Pokrovsky V.B. Mathematical modeling and optimization of distillation units. *Chemistry*, 2017. 3rd ed. 225 p.
- 4 Palancz B. Mathematical Models for Rectification Processes. *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, 2022. Vol.27. N. 1. P. 247–270.
- 5 Duyfjes G., Grinten P.M. Application of a mathematical model for the control and optimization of a distillation plant. *Automatica*, 2019. Vol. 9. N. 5. P. 537-547. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(73\)90040-X](https://doi.org/10.1016/0005-1098(73)90040-X).
- 6 Khazeev A.A., Cherepanova M.V. Mathematical Modeling of the Basic Rectification of the Methanol-Raw. Perm National Research Polytechnic University: Chemical Technology and Biotechnology, 2022. N. 2. P. 23–42.
- 7 Savelyev M.Yu. Optimization of the operation of a rectification plant: review of the state of the issue. *Bulletin of Omsk State Technical University*, 2022. Vol. 330. N. 7. P. 25–28.

- 8 Anikin A.V. Modeling the rectification process using freely available software. Trends in the development of science and education, 2019. Vol. 48. N. 6. P. 55–58. DOI: 10.18411/lj-03-2019-129.
- 9 Shakeri Z, Benfriha Kh., Shirinbayan M., Ahmadifar M., Tcharkhtchi A. Mathematical Modeling and Optimization of Fused Filament Fabrication (FFF) Process Parameters for Shape Deviation Control of Polyamide 6 Using Taguchi Method. Polymers, 2021. Vol. 13. N. 21. P.36-57. <https://doi.org/10.3390/polym13213697>
- 10 Tuleuov Zh.N., Suleimenov D. Tekhnologicheskie reglamenty dlya ustanovki zamedlennogo koksovaniya ANPZ DCU 21–10/6. [Tuleuov Zh.N., Suleimenov D. Technological regulations for the delayed coking unit DCU 21–10/6 of the Atyrau Refinery]. Atyrau: Atyrauskii Universitet Nefti I Gaza [Atyrau: Atyrau University of Oil and Gas], 2018. 217 p.
- 11 Pavlov, S.Yu., Kulov, N.N., Kerimov, R.M. Improvement of Chemical Engineering Processes Using Systems Analysis. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2019. Vol. 53. N. 2. P. 117–133.
- 12 Assanova B., Orazbayev B., Moldasheva Zh., Makhatova V., Tuleuova R. A fuzzy decision-making method for controlling operation modes of a hard-to-formalise rectification column of a delayed coking unit. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2024. Vol 1. N. 463. P. 17-30.
- 13 Bochkarev V.V. Optimization of chemical technological processes. Publishing House Yurayt, 2017. 337 p.
- 14 Gutsykova S.V. Metod ekspertnykh ocenok. Teoriya I praktika. [Method of expert assessments. Theory and practice]. Moskva: Izdatelskii Dom RAN [Moscow: RAS Publishing House], 2011. 278 p. ISBN: 978-5-9270-0209-2.
- 15 Jorgensen, M. A Review of Studies on Expert Estimation of Software Development Effort. Journal of Systems and Software, 2019. V.70. P. 37-60.
- 16 Ryzhov A.P. Elementy teorii nechetkikh mnozhestv I ee prilozheni [Fuzzy set theory and its applications]. Moskva: Moskovskii Gosudarstvennyi Universitet [Moscow.: Moscow State University], 2017. 278 p. ISBN: 978-3-540-70777-6.
- 17 Zimmermann H.J. Fuzzy Set Theory and Its Applications. Springer Science+Business Media, 2018. 525 p. ISBN: 978-94-010-3870-6.
- 18 Volin Yu.M., Ostrovsky G.M. Multicriteria optimization of technological processes in conditions of uncertainty. Automation and Remote Control, 2017. Vol. 53. N. 3. P. 165–178.
- 19 Kahraman C. Fuzzy Multi-Criteria Decision Making. Theories and Applications with Recent Developments, 2018. P. 592–608.
- 20 Ostrovsky G.M., Ziyatdinov N.N., Lapteva T.V., Silvestrova A. Optimization of Chemical Process Design with Chance Constraints by an Iterative Partitioning Approach. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2019. Vol. 54. N. 13. P. 3412–3437.
- 21 Dieter M.I., Pfenninger S. Introduction to Systems Analysis. Mathematically Modeling Natural Systems. Springer Link, 2018. 267 p. ISBN : 978-3-642-30638-9.
- 22 Ibrahim D., Jobson M., Li J., Guillen-Gosalbez G. – Optimization-based design of crude oil distillation units using surrogate column models and a support vector machine. Chemical engineering research & design, 2018. Vol. 134. P. 212–225.
- 23 Karmanov F.I. Ostreykovsky V.A. Statisticheskie metody obrabotki eksperimental'nykh dannykh [Statistical methods for processing experimental data using the MathCad package]. Moskva: Radio i kommunikacii, [Moscow: Radio and Communications], 2019. 187 p. ISBN: 978-5-905554-96-4.
- 24 Radin B.A. Beyond Machiavelli: policy analysis comes of age. Washington: Georgetown University Press, 2017. 378 p. ISBN 0878407731.
- 25 Sheikus A., Kovalenko V., Kotok V., Levchuk I., Darovskih L. Optimization of Rectification Process Using Mobile Control Action with Account for Criterion of Maximizing Separation Quality. EUREKA: Physics and Engineering, 2020. Vol. 17. N. 6. P. 33–40. DOI: 10.21303/2461-4262.2020.00150
- 26 Melnikova I.V., Sakulina V.P. Math statistics. Graduate School, 2022. 132 p. ISBN 978-5-7638-4595-2.
- 27 Nadir N., Ziyatdinov D., Emelyanov I., Ryzhova A., Chernakov P. Algorithm and software for the optimal technological design of a system of simple distillation columns. Fine Chemical Technologies, 2021. Vol. 16. N. 5. P. 379–389. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-5-379-389>.

Авторлар туралы мәлімет:

Асанова Бактыгул Унгарсиновна – PhD, Физика, математика және ақпараттық технологиялар факультетінің деканы, Х.Досмұхамедов атындағы Атырау университеті, Студенттер даңғ. 1, Атырау қ., Қазақстан.

Оразбаев Батырбай Бидайбекович – Техника ғылымдарының докторы, Қазақстан Республикасы Инженерлік академиясының академигі, Жүйелік талдау және басқару кафедрасының профессоры, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтбаев көш. 2А, Астана қ., Қазақстан.

Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ хабаршысы. Математика, компьютерлік ғылымдар, механика сериясы, 2024, Том 149, №4
Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева. Серия Математика, компьютерные науки, механика, 2024, Том 149, №4

Шангитова Жанна Ерболатовна – PhD, "Бағдарламалық инженерия" кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Х.Досмұхамедов атындағы Атырау университеті, Студенттер даңғ. 1, Атырау қ., Қазақстан.

Assanova Baktygul Ungarsynovna – PhD, Dean of the Faculty of Physics, Mathematics and Information Technologies, Kh. Dosmukhamedov Atyrau University, Studenchesky ave. 1, Atyrau, Kazakhstan.

Orazbayev Batyrbai Bidaibekovich – Doctor of Technical Sciences, Academician of the Engineering academy of the Republic of Kazakhstan, professor of the department of System analysis and Control, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Satpayev str. 2A, Astana, Kazakhstan.

Shangitova Zhanna Yerbolatovna – Associate professor of the department of Program Engineering, Kh. Dosmukhamedov Atyrau University, Studenchesky ave. 1, Atyrau, Kazakhstan.

*Қабылданған күні: 10.10.2024. Өңдеуден кейін: 15.10.2024.
Мақұлданған күні: 25.11.2024. Онлайн қолжестімді: 30.12.2024.*