



ӘОЖ 656

ҒТАХА 73.29.61

https://doi.org/10.53364/24138614_2026_41_2_7

М.М. Нуржаубаев^{1*}, А.С. Избаирова¹, Л.Х. Сарсенбаева², Г.М. Имашева¹,
С. Болатқызы¹

¹Сатпаев Университеті, Алматы, Қазақстан

² Батыс Қазақстан инновациялық-технологиялық университеті, Орал, Қазақстан

*E-mail: make1370@mail.ru

ЖҮК АҒЫНДАРЫНЫҢ БОЛЖАМЫН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП, АЛМАТЫ ТОРАБЫНЫҢ СТАНЦИЯЛАРЫНДА ҚҰРАМДАРДЫ ҚҰРАСТЫРУДЫҢ ОҢТАЙЛЫ ЖОСПАРЫН ЕСЕПТЕУ ӘДІСТЕМЕСІ

Аңдатпа. Пойыздарды құрастыру жоспарын (ПҚЖ) оңтайландыру есебінен Қазақстан темір жолдарында тасымалдау үрдісінің тиімділігін арттыру транзиттік ағындардың өсуі жағдайында, әсіресе Алматы сияқты негізгі бөлімшелерде аса маңызды міндет болып табылады. Тасымалдауды басқарудың аумақтық орталығында (ТБАО-2) пайдаланылатын ПҚЖ есептеудің дәстүрлі әдістері көбінесе күрделі тармақталған полигондарда вагон ағындарының жаһандық оңтайландырылуын және жоғары транзитін қамтамасыз етпейді. Зерттеудің мақсаты Алматы бөлімшесінің полигондарында оңтайлы ПҚЖ құру үшін транзитті динамикалық болжау әдісін әзірлеу және сынақтан өткізу болып табылады.

Жұмыстың негізі транзитті максимизациялау критерийімен (T_p) оңтайландырудың көп сатылы мәселесі ретінде үрдісті рәсімдейтін математикалық модель болып табылады. Бұл әдіс «соңынан бастап» жұмыс істейді: алдымен тағайындалған станция талданады, содан кейін кері қарай жөнелту пунктіне қарай жылжиды. Барлық жол бойында вагондар ағынын топтастыру немесе бөлу мәселесі әрбір мамандандырылған станцияда вагондардың тұрып қалу уақытын қысқарту мүмкіндіктерін салыстыру арқылы шешіледі. Автоматтандырылған басқару жүйесінде (АБЖ) іске асыруға жарамды сызықтық бағыттар мен іргелес көпбұрыштар үшін егжей-тегжейлі алгоритмдер мен блок-схемалар әзірленді.

Әдісті қолдану айтарлықтай әсер етті. 15 станция мен екі іргелес полигонда 13 790 вагон-сағатты үнемдей отырып, оңтайлы ПҚЖ алуға мүмкіндік туды. 6 станцияның сызықтық бағыты үшін салыстырмалы талдау көрсеткендей, ұсынылған әдіс тағайындалған станцияға пойыздар арқылы келетін ағындардың санын 25-30% — га, ал транзитпен жүретін станциялардың санын дәстүрлі әдістемемен салыстырғанда 5-тен 8-ге дейін арттыруға мүмкіндік береді. Полигонға кіре берістегі ағындардың қуатын екі есе арттыру вагон-сағатты 3,5–4 есе үнемдеуге әкелді.

Транзитті динамикалық болжау әдісі вагон ағындарын ұйымдастырудың түбегейлі жаңа тәсілі болып табылады. Ол транзитивтілікті едәуір арттыруды, сұрыптау жұмысының көлемін қысқартуды және жүктерді жеткізуді жеделдетуді қамтамасыз етеді. Әзірленген алгоритмдер «Қазақстан теміржолы» Ұлттық компания» Акционерлік қоғамының Алматы бөлімшесінің ТБАО-2 АБЖ -не енгізу үшін бейімделген және нақты уақыт режимінде ПҚЖ түзету үрдісін автоматтандыруға мүмкіндік береді, бұл жедел басқарудың зияткерлік жүйелеріне көшу үшін негіз жасайды.

Түйін сөздер: пойыздарды құрастыру жоспары, транзиттілік, динамикалық болжау, оңтайландыру, вагон ағыны, теміржол полигоны, алгоритм, вагон-сағатты үнемдеу, «ҚТЖ» ҰК» АҚ.

Кіріспе.

«Жібек жолы» сияқты халықаралық көлік дәліздерінің негізгі элементі бола отырып, Қазақстан Республикасының теміржол көлігі тасымалдау үрдісінің тиімділігін сапалы арттыру міндетіне тап болады [1]. Транзиттік және ішкі жүк ағындарының өсуі инфрақұрылымды экстенсивті дамытудан қолданыстағы қуаттарды пайдалануды терең оңтайландыруға негізделген қарқынды басқару әдістеріне көшуді талап етеді [2,3]. Бұл тұрғыда орталық орынды вагон ағындарын ұйымдастыру технологиясын жетілдіру алады, оның жүрегі пойыздарды құрастыру жоспары (ПҚЖ) болып табылады.

Әдебиетте [4,5] кеңінен сипатталған ПҚЖ-ны дамытудың классикалық әдістері вагондар тобының ілесіп сұрыптау станцияларын қайта өңдеусіз жүріп өтуінен уақытты үнемдеуді белгіленген масса немесе ұзындық құрамдарын жинақтау шығындарымен салыстыруға негізделген. Бұл әдістер интуитивті және есептеу құны аз болғандықтан, айтарлықтай жүйелік кемшілікке ие: есептеу жөнелту станциясынан тағайындалған станцияға дейін дәйекті түрде жүргізіледі, бұл көп жағдайда вагон ағындарының жасанды төмен түсуіне және олардың мерзімінен бұрын таралуына әкеледі [6]. Нәтижесінде транзиттік әлеует іске асырылмайды-аралық өңдеусіз жүретін вагон ағынының үлесін сипаттайтын негізгі көрсеткіш. Бұл маневрлік жұмыстың артық көлеміне, вагон айналымының уақытының ұлғаюына және жүкті жеткізу жылдамдығының төмендеуіне әкеледі.

Теміржол көлігін оңтайландыру саласындағы заманауи зерттеулер динамикалық және стохастикалық модельдерді, математикалық бағдарламалау әдістерін және жасанды интеллектті қолдану үрдісін көрсетеді [7,8,9]. Атап айтқанда, маршруттау және композицияларды құрастыру міндеттері үшін динамикалық бағдарламалау әдістері белсенді қолданылады, бұл көп сатылы үрдістер үшін жаһандық оңтайлы шешімді табуға мүмкіндік береді [10,11]. Алайда, олардың жанасуы бар тармақталған желі жағдайында транзитивтілікті барынша арттыруға баса назар аудара отырып, ПҚЖ міндетіне бейімделуі, әсіресе Қазақстанның темір жолдары контекстінде жеткілікті зерттелмеген.

Бұл зерттеудің мақсаты Қазақстан Республикасының теміржол полигондарында пойыздарды құрастыру жоспарын оңтайландыру үшін динамикалық болжау әдісін әзірлеу, Алгоритмдеу және практикалық верификациялау болып табылады. Әдіс тасымалдауды жеделдетуге, вагон айналымын қысқартуға және сұрыптау станцияларына жүктемені азайтуға тікелей байланысты кешенді критерий ретінде вагон ағындарының транзитін барынша арттыруға бағытталған.

Мақсатқа жету үшін келесі міндеттер шешілді:

- Транзиттік критерийі бар динамикалық болжаудың математикалық моделі түрінде ПҚЖ оңтайландыру мәселесін рәсімдеу.

- Сызықтық бағыттар мен түйіндік түйіспелері бар күрделі көпбұрыштар үшін әмбебап есептеу алгоритмдері мен құрылымдық блок-схемаларын әзірлеу.

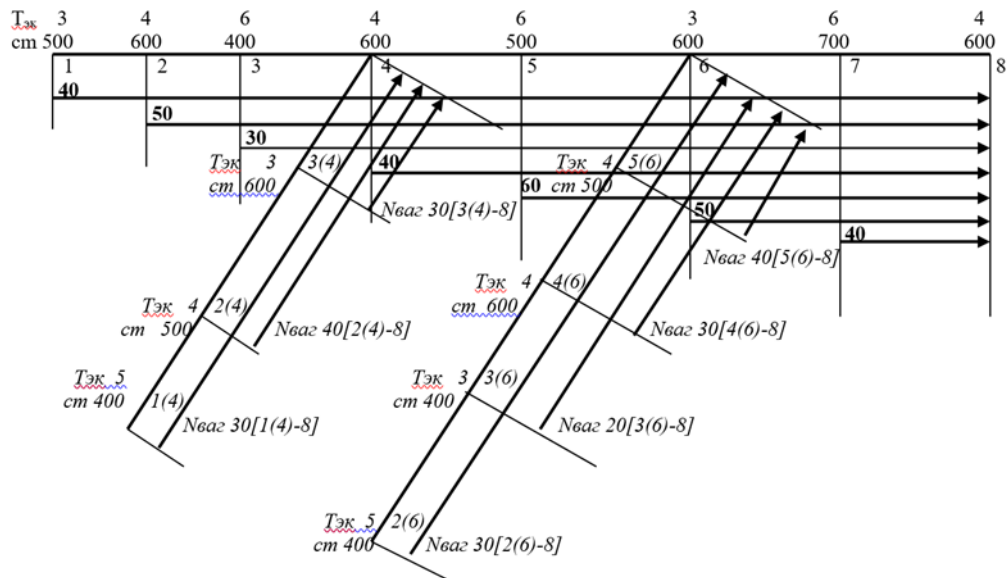
- Әдістің тиімділігін сандық бағалау және оның нәтижелерін дәстүрлі әдістеме бойынша алынған шешімдермен салыстыру үшін сынақ полигондарында сандық эксперименттер жүргізу.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы ПҚЖ міндетімен динамикалық болжау принципін (есептеудің кері бағытын) синтездеу және экономикалық және технологиялық көрсеткіштерді біріктіретін мақсатты функция ретінде транзитивтілікті енгізу болып табылады. Практикалық маңыздылығы әзірленген алгоритмдердің «ҚТЖ» ҰК» АҚ АБЖ-не ПҚЖ-ны автоматтандырылған есептеу және жедел түзету үшін енгізуге дайындығымен

анықталады, бұл тасымалдауды басқарудың зияткерлік жүйесін құруға қадам болып табылады.

Материалдар мен зерттеу әдістері.

Динамикалық болжау әдісін сынақтан өткізу үшін объект ретінде «ҚТЖ» ҰК» АҚ Алматы тасымалдау бөлімшесінің (ТБАО-2) жағдайларына тән модельдік полигон таңдалды. Әр түрлі күрделілік деңгейінде тексеру үшін үш көпбұрыштан тұратын кешен пайдаланылды: базалық сызықтық (6 Станция), күрделі тармақталған (15 станция) бөлімше желісі телімінің жалпыланған моделі ретінде және қуаты аз ағындары бар полигон (9 станция); әрбір полигон үшін бастапқы деректер әрбір ағын үшін (*i* станциядан *j* станциясына дейінгі вагондар тобы) N_{ij} (ваг) қуатын қамтитын вагон ағындарының сатылы кестесі; *k* әрбір ілеспе сұрыптау станциясында $T_{эк}$ (сағ) үнемдеу уақыты және құрастыру станциясында *см* (вагон-сағ) жинақтау шығындары болып табылады. Параметрлер бөлімнің типтік стандарттарын талдау негізінде 15 станциясы бар көпбұрышқа арналған мәліметтер жиынтығы 1-суретте келтірілген.



Сурет 1 – Іргелес полигонның схемасы (15 станция) және N , $T_{эк}$, *см* параметрлері бар вагон ағындарының сатылы кестесі

Әдістің негізінде вагон ағындарын ұйымдастыруды жүк ағыны мен вагон ағындар (C_{rb}) жүйесінің күй кеңістігінде оңтайландырудың көп сатылы міндеті ретінде ұсыну жатыр. Нысаналы критерий транзитивтілік (T_p) болып табылады — кешенді көрсеткіш, оның максимизациясы жеткізуді жеделдету, вагон айналымын қысқарту және сұрыптау жұмысын азайту жөніндегі міндеттерді бір мезгілде шешуді қамтамасыз етеді. Әдістің негізгі айырмашылығы - кері соққы принципі — соңғы тағайындалған станциядан ағынның пайда болу станцияларына дейін [12].

Көршілес станциялар арасындағы әр кезеңде (ω) формула бойынша вагон-сағаттың (ω_3) жергілікті үнемделуі есептеледі:

$$\omega_3 = N \sum T_{эк} - см, \tag{1}$$

мұндағы N - кезеңдегі ағынның қуаты; $\sum T_{эк}$ - кезеңнің барлық ілеспе станцияларында уақытты үнемдеу; *см* - жинақтау шығындары. Кезеңдер тобы немесе бағыт үшін жалпы W үнемдеу жиынтықпен анықталады:

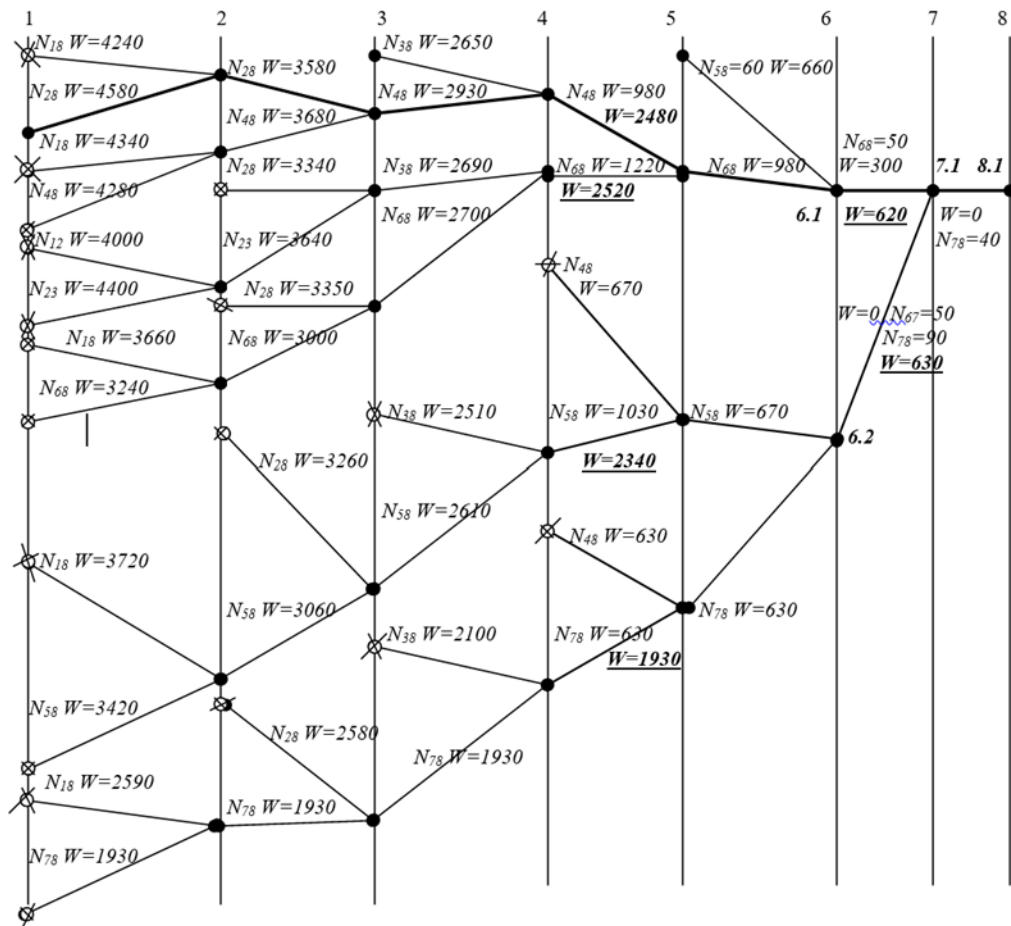
$$W = \omega_i + \omega_{i+1} + \dots + \omega_s, \tag{2}$$

Әр қадамда шартты-оңтайлы шешім таңдалады: транзиттік ағынды бөлу немесе оны қуатты арттыру мақсатында сол мақсаттағы ілеспе ағынмен біріктіру үшін келесі станцияға ауыстыру. i станциядан s станциясына мұндай ауысудың орындылығы шарты теңсіздікпен ресімделеді:

$$c_i m_i - \left\{ c_s m_s + N_{ij} \sum_{i+1}^s t \right\} > 0, \tag{3}$$

мұндағы $c_i m_i$, $c_s m_s$ - i және s станцияларында жинақтау шығындары; $N_{ij} \sum_{i+1}^s t$ - $i+1$ -ден s -ге дейінгі телім ағынының транзиттік өтуінен үнемдеу.

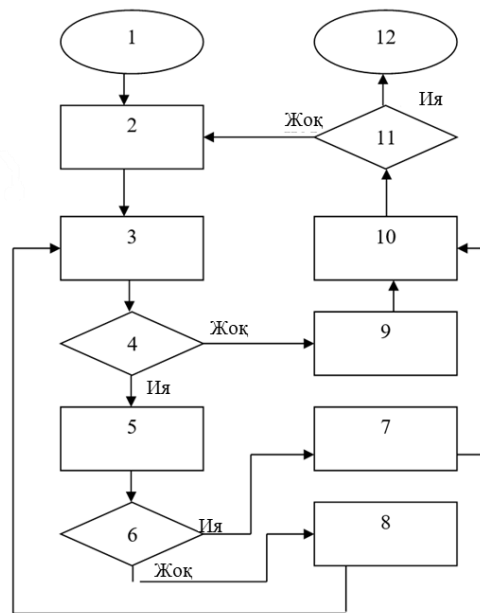
Ағындардың оңтайлы комбинациясын табу үрдісі (мақсатқа жету тармағы) әдісімен көрінеді (2-сурет). Станцияларға сәйкес келетін сызықтардағы шындар жүйенің күйлерін, ал бұтақтар реактивті алға жылжудың нұсқаларын білдіреді. Әр жолда минималды үнемдеу опциялары кесіліп, шамадан тыс экспоненциалды қысқартуды қамтамасыз етеді.



Сурет 2 – 15 станциясы бар полигонда құрастырудың оңтайлы жоспарын анықтау үшін мақсат ағашы (фазалық кеңістік)

Бағдарламалық жасақтаманы іске асыру үшін екі алгоритм жасалды. Логикалық құрылымы 3-суретте көрсетілген сызықтық көпбұрыштың алгоритмі негізгі қадамдарды қамтиды: деректерді енгізу, соңғы станциядан есептеуді бастау, үш нұсқа үшін үнемдеуді есептей отырып, кері тәртіпте станциялар бойынша цикл (транзит, біріктіру, тасымалдау),

әр қадамда шартты оңтайлы нүктені таңдау, алдыңғы станцияға өту және қорытынды ПҚЖ-ны шығару.



Сурет 3 – Сызықтық бағыт үшін динамикалық болжау әдісімен оңтайлы ПҚЖ есептеу алгоритмінің блок-схемасы

Сызықтық бағыт үшін пойыздарды құрастыру жоспарын есептеу алгоритмі 12 негізгі операциядан тұрады және динамикалық болжаудың кері есептеу қағидасына негізделген. Әр операция алдыңғы кезеңде алынған шартты-оңтайлы шешімдерді ескере отырып орындалады және жалпы вагоно-сағат үнемін максимизациялауға бағытталған.

1-операция. Бастапқы инициализация. Есептеу процесі полигонның соңғы тағайындалған станциясынан басталады. Бұл кезеңде вагон ағындарының қуаты N_{ij} , ілеспе станциялардағы транзиттік өтуден алынатын уақыт үнемі W және құрамдарды жинақтау шығындары st енгізіледі. Жалпы үнемдеу көрсеткіші W нөлге теңестіріледі.

2-операция. Кері бағыттағы станцияны таңдау. Алгоритм соңғы станциядан бастап алдыңғы станцияларға қарай қозғалып, ағымдағы есептеу үшін i -ші станцияны анықтайды.

3-операция. Транзиттік нұсқаны бағалау. Вагон ағынының i -ші станциядан кейінгі барлық ілеспе станциялардан қайта өңдеусіз өтуі жағдайында алынатын жергілікті вагоно-сағат үнемі (1) формула бойынша есептеледі.

4-операция. Біріктіру нұсқасын бағалау. Ағымдағы ағынды келесі бағыттағы ілеспе ағынмен біріктіру мүмкіндігі қарастырылады. Бұл жағдайда үнемдеу шамасы вагон ағынының қуаты мен жинақтау шығындарын ескере отырып анықталады.

5-операция. Ағынды бөлу нұсқасын бағалау. Егер транзиттік немесе біріктіру нұсқалары экономикалық тұрғыдан тиімсіз болса, ағынды осы станцияда бөліп, жеке тағайындау ретінде қалдыру нұсқасы қарастырылады.

6-операция. Шартты-оңтайлы шешімді таңдау. Үш балама нұсқа бойынша есептелген үнемдеу мәндері салыстырылады және ең үлкен оң нәтиже беретін нұсқа шартты-оңтайлы ретінде қабылданады.

7-операция. Экономикалық шартты тексеру. Таңдалған нұсқаның орындылығы (3) теңсіздік арқылы тексеріледі. Егер шарт орындалмаса, балама нұсқаға көшу жүзеге асырылады.

8-операция. Жергілікті нәтижені бекіту. Таңдалған шартты-оңтайлы шешім ағымдағы станция үшін тіркеледі.

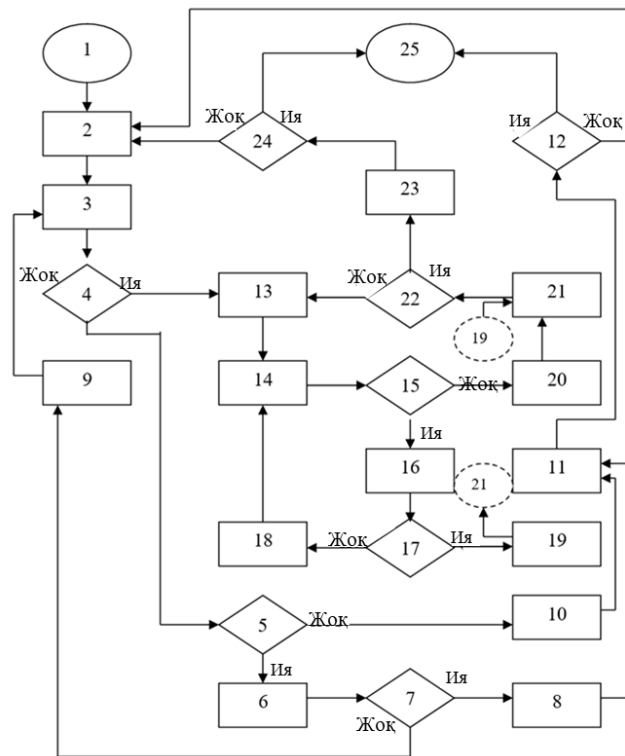
9-операция. Жалпы үнемдеуді жаңарту. Ағымдағы кезеңде алынған вагоно-сағат үнемі W жиынтық көрсеткішіне қосылады.

10-операция. Келесі станцияға өту. Алгоритм есептеуді алдыңғы станцияға ауыстырады.

11-операция. Тоқтау шартын тексеру. Егер бастапқы станцияға жетпесе, есептеу циклы жалғасады.

12-операция. Қорытынды жоспарды қалыптастыру. Барлық станциялар бойынша қабылданған шартты-оңтайлы шешімдер негізінде соңғы пойыздарды құрастыру жоспары және жалпы вагоно-сағат үнемі қалыптастырылады.

Осылайша, алгоритм сызықтық бағыттар үшін есептеу күрделілігі төмен және жедел қолдануға ыңғайлы оңтайлы ПҚЖ алуға мүмкіндік береді. ТБАО-2 моделіне ұқсас күрделі желілер үшін блок-схемасы 4-суретте көрсетілген іргелес көпбұрыш үшін әмбебап алгоритм жасалды. Алгоритмнің циклдік құрылымы бар: негізгі түйісу бекетіне дейін жүру бойынша есептеу, бірдей динамикалық болжау аппаратын қолдана отырып, барлық түйісу станциялары бойынша толық есептеу, негізгі түйісу бекетіне дейін жүру түйініне оралу және түйісуден жалпы күшейтілген ағындарды есепке алу, бастапқы станцияға дейін негізгі түйісу бекетіне жүру бойынша есептеуді жалғастыру. Алгоритм автоматты түрде негізгі бағыттың мақсаттарына түйіспелерден ағындарды енгізу немесе олар үшін жеке маршруттар құру тиімдірек екенін анықтайды.



Сурет 4 – Түйіндік түйіспелері бар тармақталған көпбұрыш үшін ПҚЖ есептеу алгоритмінің әмбебап блок-схемасы

Түйіндік түйіспелері бар тармақталған теміржол полигондары үшін пойыздарды құрастыру жоспарын есептеу алгоритмі 25 операциядан тұрады және сызықтық бағытқа арналған алгоритмді ішкі модуль ретінде қамтиды. Алгоритмнің негізгі ерекшелігі – түйіспелерде пайда болатын вагон ағындарын дербес өңдеу және оларды негізгі бағытпен экономикалық тұрғыдан тиімді түрде интеграциялау мүмкіндігі [13].

1–3-операциялар. Негізгі бағыт бойынша бастапқы есептеу. Есептеу полигонның соңғы станциясынан негізгі бағыт бойымен кері бағытта басталады және бастапқы параметрлер инициализацияланады.

4-операция. Түйіспенің бар-жоғын анықтау. Ағымдағы станцияда тармақталған түйіспе бар-жоқтығы тексеріледі.

5–12-операциялар. Негізгі бағыттағы шартты-оңтайлы шешімдерді таңдау. Егер түйіспе анықталмаса, есептеу сызықтық алгоритм логикасы бойынша жалғасады.

13–22-операциялар. Түйіспе желісін дербес өңдеу. Егер түйіспе бар болса, осы тармаққа жататын барлық станциялар үшін жеке динамикалық болжау циклы іске қосылады. Бұл жағдайда түйіспе станциясы ішкі есептеудің соңғы станциясы ретінде қарастырылады.

23-операция. Ағындарды интеграциялау. Түйіспе бойынша алынған оңтайлы вагон ағындары негізгі бағыттағы ағындармен біріктіру немесе жеке тағайындау ретінде қалдыру тұрғысынан бағаланады.

24-операция. Келесі станцияға көшу. Негізгі бағыт бойынша есептеу алдыңғы станцияға ауыстырылады.

25-операция. Қорытынды нәтижені қалыптастыру. Негізгі бағыт пен барлық түйіспелер үшін алынған шешімдер біріктіріліп, бүкіл полигон үшін оңтайлы пойыздарды құрастыру жоспары және жалпы вагоно-сағат үнемі анықталады.

Әмбебап алгоритмнің модульдік құрылымы оны кез келген күрделіліктегі теміржол желілеріне қолдануға және автоматтандырылған басқару жүйелерінде іске асыруға мүмкіндік береді.

Есептеулер дамыған алгоритмдерді эмуляциялау арқылы жүргізілді. Әрбір полигон үшін өтпелі және телімдік мақсаттардың оңтайлы жиынтығы, вагон-сағаттардың жиынтық үнемделуі (W), межелі станцияларға қайта өңдеусіз келетін ағындардың саны, транзитпен жүретін станциялардың орташа саны және қайта өңделетін вагондардың көлемі айқындалды. Әдістің тиімділігі осы көрсеткіштерді ПҚЖ есептеудің дәстүрлі әдістемесі бойынша алынған нәтижелермен салыстыру арқылы бағаланды (бір станциядағы жергілікті үнемдеу критериясы). Сонымен қатар, кіріс параметрлерінің вариацияларының (N , $T_{ЭК}$, cm) оңтайлы шешімнің тұрақтылығына әсері зерттелді [14,15].

Нәтижелер және оларды талқылау.

Әдістің бастапқы бағалау 6 станциядан тұратын сызықтық полигонда жүргізілді. Мақсат модельдің негізгі параметрлердің өзгеруіне сезімталдығын зерттеу болды: реактивті қуат (N), үнемдеу уақыты ($T_{ЭК}$) және жинақтау шығындары (cm). 250 параметр тіркесімі есептелді. Алынған деректер (1-кесте) $T_{ЭК}$ 1 сағатқа және cm 100 вагон — сағат шегінде өзгерген кезде сапалық нәтиже — межелі станцияларға жететін ағындар саны-тұрақты болып қалатынын көрсетеді. Өтпелі тағайындауларда жалпы транзиттік потенциалдың 50% - ы (810 вагонның 400-ге жуығы) жүреді, бұл алгоритмнің ұялшақтығын растайды.

Кесте 1 – $T_{ЭК}$ және cm параметрлерінің вариацияларының сызықтық полигон үшін оңтайлы құрастыру жоспарының құрылымына әсері (6 станция)

Қосалқы нұсқалар	Қосалқы нұсқалар тобының нөмірлері (вагондар бойынша)	Өтпелі тағайындаулар	Өтпелі тағайындаулардағы вагондар саны
I	1—40, 45—56, 61-72	1—5	140
	77—88, 93—104, 109—120,	3—6	210
	125—256		350
II	41—44, 57—60, 73-76	2—5	190
	89—92, 105—108	3—6	210
	121—124		400

Параметрлердің сандық үнемдеу көрсеткішіне айтарлықтай әсері бар. 2-кестеден көріп отырғанымыздай, вагон-сағаттың (W) жалпы үнемдеу шамасының ауытқуы 200% немесе одан да көпке жетеді, бұл жоспарды дұрыс экономикалық бағалау үшін $T_{эк}$ және $ст$ дәл мөлшерлеудің маңыздылығын көрсетеді. Ең көрнектісі-полигонға кіре берістегі ағындардың қуатын арттыру нәтижесі. N мәндері екі еселенгенде, пойыздар арқылы өтетін вагондар саны пропорционалды түрде өсті, ал W жалпы үнемдеуі 3.5–4 есе өсті, бұл әдістің бастапқы ағындардың қуатын транзит пен ресурстарды үнемдеудің өсуіне тиімді түрлендіру қабілетін дәлелдейді.

Кесте 2 – Сызықтық полигон үшін $T_{эк}$, $ст$ және N комбинацияларына байланысты вагон-сағаттың жалпы үнемдеуінің (W) өзгеру диапазоны

Қосалқы нұсқалар тобының нөмірлері (вагон-сағ. бойынша)	Сәйкесінше $\sum T_{эк}$ и $T_{эк}$, сағ.		Үнемдеу ауқымы, вагон-сағ.	
			верхний	нижний
1—16, 17—32, 33—48, 49—64	12(3,3,3,3), 13(3,3,4,3),	13(3,3,3,4), 14(3,3,4,4)	720—1280	520—1080
65—80, 81—96, 97—112, 113—128, 129—144, 145—160, 161—176, 177—192	13(3,4,3,3), 14(3,4,4,3), 13(4,3,3,3), 14(4,3,4,3),	14(3,4,3,4), 15(3,4,4,4), 14(4,3,3,4), 15(4,3,4,4)	860—1420	660—1220
193—208, 208—224, 225—240, 241—256	14(4,4,3,3), 15(4,4,4,3),	15(4,4,3,4), 16(4,4,4,4)	1000—1560	800—1360

Негізгі эксперимент күрделі тармақталған полигон үшін орындалды (15 станция екі түйіспе бекеттермен), оның сызбасы 1-суретте көрсетілген және Алматы бөлімшесінің жұмыс жағдайларын модельдейтін (ТБАО-2). Әмбебап алгоритмді қолдану (4-сурет) максималды транзитті қамтамасыз ететін оңтайлы құрастыру жоспарын алуға мүмкіндік берді. Негізгі нәтиже 13 790 вагон-сағатты жалпы үнемдеу болды. 2-суретте (мақсат ағашы) көрсетілген ПҚЖ-нің ең жақсы нұсқасы тағайындауларды қамтиды: N_{28} (90 ваг.), N_{48} (170 ваг.), N_{68} (180 ваг.) және $N_{3(6)-8}$ (50 ваг.). Осылайша, транзиттік пойыздардағы 8 терминал станциясына төрт қуатты ағынға біріктірілген 490 вагон келеді. Дәстүрлі логиканы тексеру есебімен салыстыру әдістің тиімділігін растады. Ұқсас жағдайдағы дәстүрлі тәсіл тек бір реактивті (35 вагон) мақсатты құрастыруға әкеледі, ал динамикалық болжау әдісі жалпы қуаты 105 вагоннан тұратын үш біріктірілген реактивті ұшақтың келуін қамтамасыз етеді. Бұл әдістің ағындарды ерте кезеңдерде шоғырландыру мүмкіндіктерін анықтау және пайдалану қабілетін айқын көрсетеді, бұл әсіресе жүктелген ТБАО-2 түйіндеріне қатысты.

Объективті бағалау үшін бір сызықтық бағыт (6 станция) үшін жаңа және дәстүрлі әдіспен алынған нәтижелерді тікелей салыстыру жүргізілді. Салыстырмалы деректер 3-кестеде келтірілген. Талдау ұсынылған әдістің сапалық артықшылығын көрсетеді: ол 75% - ға көп ағындардың келуін қамтамасыз етеді (7-ден 4-ке дейін), бұл жүктерді жеткізуді тікелей жылдамдатады. Сондай-ақ транзитпен жүргізілетін станциялар саны бойынша транзиттің 60% - ға өсуі байқалады (8-ден 5-ке дейін), бұл телімдердің өткізу қабілетін неғұрлым толық пайдалану және сұрыптау станцияларын түсіру туралы куәландырады. Экономикалық тиімділік вагон-сағаттың 27% - дық қосымша үнемдеуімен расталады (2020 шартқа қарсы 2570 бірлік) тіпті тағайындаулардың салыстырмалы саны болса да, бұл вагондардың үлкейтілген топтарының ұзақ жүруіне байланысты қол жеткізіледі.

Кесте 3 – ПҚЖ тиімділігінің салыстырмалы көрсеткіштері

Көрсеткіштер	Динамикалық болжау әдісі	Дәстүрлі әдіс	Өзгеру, %
Межелі станцияға келген ағындардың саны	7	4	+75%
Транзитпен жүретін станциялар саны	8	5	+60%
Өтпелі пойыздарда жүретін вагондардың көлемі (810-нан)	520	370	+40%
Қайта өңделетін вагондардың көлемі	740	810	-9%
Вагон сағаттарының жалпы үнемделуі (W), шартты бірлік	2 570	2 020	+27%

Алынған нәтижелер Алматы бөлімшесінің ТБАО-2 басқару контурында динамикалық болжау әдісін енгізу маңызды операциялық және экономикалық нәтиже беретінін көрсетеді. Ұсынылған алгоритмдер бойынша автоматтандырылған есептеу тиімді статикалық жоспар құруға ғана емес, сонымен қатар жедел жағдайдың өзгеруіне (сәтсіздіктер, ағынның өзгеруі) жауап ретінде оны жедел қайта конфигурациялауға мүмкіндік береді. Түзету оңтайлылықтың жоғалуына әкелетін дәстүрлі тәсілден айырмашылығы, динамикалық болжау әдісі АБЖ-да жүзеге асырыла отырып, транзитті мүмкіндігінше сақтай отырып, әр уақытта жаңа шартты-оңтайлы нұсқаны таба алады. Қолданудың негізгі шектеуі кіріс деректерінің сапасы мен өзектілігіне қойылатын талап болып табылады, алайда вагондарды дәл есепке алу технологияларын дамыту бұл шектеуді еңсеруге мүмкіндік береді. Осылайша, әдіс Алматы бөлімшесінің нақты жағдайларына құрылымдық жағынан ұқсас модельдік полигондарда өзінің тиімділігін дәлелдеді. Оның негізгі артықшылықтары — транзитивтіліктің 25-30% - ға ұлғаюы, ресурстарды үнемдеудің өсуі және автоматтандыруға жарамдылығы-ТБАО-2 жүйесінде пилоттық енгізуді ұйымдастыру үшін жеткілікті негіздер қалыптастырады.

Қорытынды.

Зерттеу теміржол полигондарында пойыздарды құрастыру жоспарын оңтайландыру мәселесін шешу үшін динамикалық болжау әдісінің жоғары тиімділігін растады. Вагон ағындарының транзиті (T_p) мақсатты критерий ретінде әрекет ететін және шешімді іздеу үрдісі кері жүріс принципі бойынша — тағайындалған станциядан жөнелту станциясына дейін жүзеге асырылатын әзірленген математикалық модель тасымалдау үрдісін ұйымдастыруға көзқарасты түбегейлі өзгертеді.

Алматы бөлімшесінің (ТБАО-2) телімдеріне құрылымдық жағынан ұқсас полигонды қоса алғанда, модельдік полигондар кешенінде әдісті тәжірибелік сынақтан өткізу сандық өлшенетін нәтижелер алуға мүмкіндік берді. Әдісті қолдану дәстүрлі есептеу әдістемесімен салыстырғанда межелі станцияларға өтетін пойыздарда келетін вагон ағындарының үлесін 25-30% - ға арттыруды қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, реактивтер саны және қайта өңдеусіз жүретін станциялар саны 60-75% - ға артады, бұл жүктерді жеткізуді жеделдетуге және вагондар айналымының қысқаруына тікелей әкеледі. Экономикалық тиімділік вагон-сағаттардың жиынтық үнемдеуінің айтарлықтай өсуінен көрінеді: стандартты жағдайлар үшін 27%-ға және кіріс ағындарының қуатын арттыру кезінде 3,5-4 есе. Күрделі тармақталған полигон үшін қол жеткізілген үнемдеу 13790 вагон-сағатты құрады, бұл ірі тасымалдау бөлімшесі шеңберінде тиімділікті арттыру үшін әлеуетті ресурстың ауқымын көрсетеді.

Әдістің негізгі практикалық артықшылығы-оны алгоритмдеу және толық автоматтандыруға жарамдылығы. Әзірленген блок-схемалар (сурет. 3, сурет. 4) ТБАО-2 АБЖ құрамында бағдарламалық модуль құру үшін дайын негіз қалыптастырады. Бұл оңтайлы статикалық жоспарды бір реттік есептеу үшін ғана емес, сонымен қатар қозғалыс өлшемдері өзгерген немесе ақаулар туындаған кезде нақты уақыттағы ПҚЖ-ны жедел динамикалық түзету үшін де мүмкіндік береді, бұл біркелкі емес жүк ағыны жағдайында өте маңызды.

Осылайша, транзитті динамикалық болжау әдісі вагон ағындарын басқару сапасын түбегейлі жақсарту үшін ғылыми негізделген және технологиялық тұрғыдан жүзеге асырылатын құрал болып табылады. Оны «ҚТЖ» ҰК» АҚ Алматы бөлімшесінің жұмыс тәжірибесіне енгізу тасымалдау үрдісін қарқындалту және жедел жоспарлаудың зияткерлік жүйесіне көшу есебінен қолданыстағы инфрақұрылымның өткізу және тасымалдау қабілетінің елеулі резервін іске асыруға мүмкіндік береді.

Әрі қарайғы зерттеулердің бағыттары ұсынылған модельді жүк ағындарын болжау және вагондардың орналасуын нақты мониторингтеу жүйелерімен интеграциялаумен, сондай-ақ ТБАО-2 диспетчерлік персоналы үшін интерфейстерді әзірлеумен байланысты болуы мүмкін.

Қаржыландыру. Мақала Қазақстан Республикасының Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің қолдауымен «Жас ғалым» АР25795671 «Көліктік тапсырмалардың көп өлшемділігін ескере отырып, Қазақстан темір жолдар желісіндегі вагон ағындарын ұйымдастыру әдістемесін әзірлеу» жобасы бойынша жас ғалымдардың зерттеулерін гранттық қаржыландыру шеңберінде орындалды.

Әдебиеттер тізімі

1. Рака, Д., Де-Лос-Сантос, А., Андраде-Пинеда, Х.Л. & Делепланке С. (2021). A multi-stage stochastic optimization model for the train unit assignment problem with uncertain demand and maintenance requirements. *Computers & Industrial Engineering*, 161, 107624. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107624.
2. Корман, Ф. & Мэнг, Л. (2021). A review of dynamic traffic management in rail transportation. *European Journal of Operational Research*, 294(3), 837-855. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.12.052.
3. Госейри, К. & Сидаровски, Ф. (2020). A multi-objective train formation planning model with fuzzy demands. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 16, 100207. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2020.100207.
4. Харрод, С., Серрето, Ф. & Нильсен, О.А. (2020). A closed-form approximation for railway line capacity. *Transportation Research Part B: Methodological*, 139, 358-377. DOI: 10.1016/j.trb.2020.06.008.
5. Он, С., Сонг, Р. & Чаудри С.С. (2019). An integrated fuzzy simulation-optimization framework for the railway freight transportation planning under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 368-380. DOI: 10.1016/j.cie.2018.10.026.
6. Ли, Х., Ван, Д., Пэн, К. & Чен, Ф. (2022). A deep reinforcement learning approach for dynamic train unit scheduling. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(8), 11056-11067. DOI: 10.1109/TITS.2021.3113642.
7. Алданазаров, К.Т., Айкумбеков, М.Н., Камзина, А.Д. & Шуренов, М.К. (2023). Жіңішке-дон бағытында вагондарды жылжытуды оңтайландыруға бағытталған шараларды дайындау. *Вестник КазАТК №1 (124)*, 172-181. DOI 10.52167/1609-1817-2023-124-1-172-181.
8. Лю, С. & Козан, Э. (2020). A two-stage approach for the directed train formation problem. *Journal of the Operational Research Society*, 71(12), 1989-2004. DOI: 10.1080/01605682.2019.1654417.

9. Алданазаров, К.Т., Айкумбеков, М.Н., Шуренов, М.К. & Каламбаева Г.А. (2023) Логистика әдістерін қолдана отырып, теміржолдың өткізу қабілетін арттыру. Вестник КазАТК №2 (125), 110-119. DOI 10.52167/1609-1817-2023-125-2-110-119
10. Казбеков, Б.К., Ахметова, З.Б. & Елешева Ж.Б. (2024) Повышение эффективности управления грузоперевозками на основе внедрения информационных технологий. Вестник КазАТК №5 (134), 115-123. DOI 10.52167/1609-1817-2024-134-5-115-123
11. Таженова, И.Ж. (2022) Развитие железнодорожного транспорта за годы независимости. Вестник КазАТК №1 (120), 81-86. DOI 10.52167/1609-1817-2022-120-1-81-86
12. Сапаров, К.Ж., Байбусинов, М.С. & Абишев, М.Е. (2023). Моделирование грузовых перевозок на железнодорожном транспорте Казахстана с применением методов динамического программирования. Вестник КазННТУ им. К.И. Сатпаева, (1), 145-154.
13. Сун, Ю., Цао, К. & Бу К. (2021). A hybrid genetic algorithm for the train formation plan problem in a large-scale rail network. *Soft Computing*, 25, 12345–12360. DOI: 10.1007/s00500-021-05878-z.
14. Кулмагамбетова, Ж.Д., Избаирова, А.С. & Попов П.В. (2025) Увеличение пропускной способности Алматинского отделения: стратегический вклад в «один пояс - один путь», Вестник АГА №2 (37), 112-121. https://doi.org/10.53364/24138614_2025_37_2_10
15. Чжан, К., Ли, К. & Гао, Ю. (2024). Digital twin-driven optimization for railway freight operations: A framework and case study. *Advanced Engineering Informatics*, 61, 102456. DOI: 10.1016/j.aei.2024.102456.

References

1. Raca, D., De-Los-Santos, A., Andrade-Pineda, J.L. & Deleplanque, S. (2021). A multi-stage stochastic optimization model for the train unit assignment problem with uncertain demand and maintenance requirements. *Computers & Industrial Engineering*, 161, 107624. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107624.
2. Corman, F. & Meng, L. (2021). A review of dynamic traffic management in rail transportation. *European Journal of Operational Research*, 294(3), 837-855. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.12.052.
3. Ghoseiri, K. & Szidarovszky, F. (2020). A multi-objective train formation planning model with fuzzy demands. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 16, 100207. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2020.100207.
4. Harrod, S., Cerreto, F. & Nielsen, O.A. (2020). A closed-form approximation for railway line capacity. *Transportation Research Part B: Methodological*, 139, 358-377. DOI: 10.1016/j.trb.2020.06.008.
5. On, S., Song, R. & Chaudhry, S.S. (2019). An integrated fuzzy simulation-optimization framework for the railway freight transportation planning under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 368-380. DOI: 10.1016/j.cie.2018.10.026.
6. Li, H., Wang, D., Peng, Q. & Chen, F. (2022). A deep reinforcement learning approach for dynamic train unit scheduling. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(8), 11056-11067. DOI: 10.1109/TITS.2021.3113642.
7. Aldanazarov, K.T., Aikumbekov, M.N., Kamzina, A.D., & Shurenov, M.K. (2023). Thin-aimed at optimizing the movement of cars in the Don direction preparation of measures. *Bulletin of KazATK №1 (124)*, 172-181. DOI 10.52167/1609-1817-2023-124-1-172-181.
8. Liu, S. & Kozan, E. (2020). A two-stage approach for the directed train formation problem. *Journal of the Operational Research Society*, 71(12), 1989-2004. DOI: 10.1080/01605682.2019.1654417.
9. Aldanazarov, K.T., Aikumbekov, M.N., Shurenov, M.K., & G.A. Kalambayeva (2023) Increasing the capacity of the railway using logistics methods. *Bulletin of KazATK №2 (125)*, 110-119. DOI 10.52167/1609-1817-2023-125-2-110-119

10. Kazbekov, B.K., Akhmetova, Z.B., & Elesheva, Zh.B. (2024) Improving the efficiency of cargo transportation management through the implementation of information technologies. Bulletin of KazATK №5 (134), 115-123. DOI 10.52167/1609-1817-2024-134-5-115-123
11. Tazhenova, I.J. (2022) The development of railway transport over the years of independence. Bulletin of KazATK №1 (120), 81-86. DOI 10.52167/1609-1817-2022-120-1-81-86
12. Saparov, K.Zh., Baybusinov, M.S. & Abishev, M.E. (2023). Modeling of freight transportation on Kazakhstan's railways using dynamic programming methods. Bulletin of KazNTU named after K.I. Satpayev, (1), 145-154.
13. Sun, Y., Cao, C. & Wu, C. (2021). A hybrid genetic algorithm for the train formation plan problem in a large-scale rail network. Soft Computing, 25, 12345–12360. DOI: 10.1007/s00500-021-05878-z.
14. Kulmagambetova, Zh.D., Izbaïrova, A.S. & Popov, P.V. (2025) Increasing the capacity of the Almaty branch: a strategic contribution to the Belt and Road Initiative, Bulletin of the CAA №2 (37), 112-121. https://doi.org/10.53364/24138614_2025_37_2_10
15. Zhang, C., Li, K. & Gao, Y. (2024). Digital twin-driven optimization for railway freight operations: A framework and case study. Advanced Engineering Informatics, 61, 102456. DOI: 10.1016/j.aei.2024.102456.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНА ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВОВ НА СТАНЦИЯХ АЛМАТИНСКОГО УЗЛА С УЧЕТОМ ПРОГНОЗА ГРУЗОПОТОКОВ

***Аннотация.** Повышение эффективности перевозочного процесса на железных дорогах Казахстана за счет оптимизации плана формирования поездов (ПФП) является важнейшей задачей в условиях роста транзитных потоков, особенно в таких ключевых подразделениях, как Алматинское отделение перевозок. Традиционные методы расчета ПФП, используемые в региональном центре управления перевозками (РЦУП-2), часто не обеспечивают глобальную оптимизацию и высокий транзит вагонных потоков на сложных разветвленных полигонах. Целью исследования является разработка и апробация метода динамического прогнозирования транзита для создания оптимальных ПФП на полигонах Алматинского отделения.*

Основой работы является математическая модель, формализующая процесс как многоступенчатую задачу оптимизации с критерием максимизации транзита (T_p). Основное отличие метода состоит в том, что «с начала» -расчет от станции назначения до станции отправления, поэтапный выбор условно-оптимальных решений по объединению или распределению вагонных потоков на основе сравнения экономии вагона-часа. Разработаны подробные алгоритмы и блок-схемы для линейных направлений и смежных многоугольников, пригодных для реализации в автоматизированной системе управления (АСУ).

Использование метода оказало значительное влияние. На 15 станциях и двух смежных полигонах удалось получить оптимальные ПФП, сэкономив 13790 вагонов-часов. Сравнительный анализ линейного маршрута 6 станций показывает, что предложенный метод позволяет увеличить количество потоков, поступающих на станцию назначения поездами, на 25-30%, а количество транзитных станций — с 5 до 8 по сравнению с традиционным методом. Удвоение мощности потоков на входе на свалку привело к экономии вагона-часа в 3,5–4 раза.

Метод динамического прогнозирования транзита является принципиально новым подходом к организации вагонных потоков. Он обеспечивает значительное повышение транзитивности, сокращение объемов сортировочных работ и ускорение доставки грузов. Разработанные алгоритмы адаптированы для внедрения в АСУ РЦУП-2 Алматинского

отделения АО «НК «КТЖ» и позволяют в режиме реального времени автоматизировать процесс коррекции ОС, что создает основу для перехода на интеллектуальные системы оперативного управления.

Ключевые слова: план формирования поездов, транзит, динамическое прогнозирование, оптимизация, вагонный поток, железнодорожный полигон, алгоритм, экономия вагоно-часов, АО «НК «КТЖ».

THE METHODOLOGY FOR CALCULATING THE OPTIMAL TRAIN LAYOUT PLAN AT THE STATIONS OF THE ALMATY HUB, TAKING INTO ACCOUNT THE FORECAST OF CARGO FLOWS

Abstract. Improving the efficiency of the transportation process on the railways of Kazakhstan by optimizing the Train Formation plan (TFP) is an important task in the context of growing transit flows, especially in such key divisions as the Almaty Transportation Department. Traditional methods of calculating the TFR used in the regional Transportation Management Center (RCMP-2) often do not provide global optimization and high transit of wagon flows at complex, branched landfills. The purpose of the study is to develop and test a method of dynamic transit forecasting to create optimal PFPS at the landfills of the Almaty branch.

The work is based on a mathematical model that formalizes the process as a multi-stage optimization problem with a transit maximization criterion (T_r). The main difference between the method is that is a calculation from the destination station to the departure station, a step-by-step selection of conditionally optimal solutions for combining or distributing car flows based on a comparison of car-hour savings. Detailed algorithms and flowcharts have been developed for linear directions and adjacent polygons suitable for implementation in an automated control system (ACS).

The use of the method had a significant impact. At 15 stations and two adjacent landfills, it was possible to obtain optimal PFPS, saving 13,790 car-hours. A comparative analysis of the linear route of 6 stations shows that the proposed method allows increasing the number of flows arriving at the destination station by trains by 25-30%, and the number of transit stations from 5 to 8 compared with the traditional method. Doubling the capacity of the flows at the entrance to the landfill led to savings of 3.5-4 times per wagon-hour.

The method of dynamic transit forecasting is a fundamentally new approach to the organization of carriage flows. It provides a significant increase in transitivity, reduction of sorting operations and acceleration of cargo delivery. The developed algorithms are adapted for implementation in the automated control system RCUP-2 of the Almaty branch of JSC NC KTZ and allow real-time automation of the OS correction process, which creates the basis for the transition to intelligent operational management systems.

Keywords: train formation plan, transit, dynamic forecasting, optimization, carriage flow, railway landfill, algorithm, saving car hours, JSC NC KTZ.

Авторлар туралы мәлімет

Нуржаубаев Мейрам Маханович	PhD докторант, Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан, Алматы қ., Қазақстан E-mail: make1370@mail.ru
Избаирова Алия Сериковна	Т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан E-mail: a.izbairova@satpayev.university
Сарсенбаева Лунара Хаберовна	Магистр, Батыс Қазақстан инновациялық-технологиялық университеті, Орал, Қазақстан, E-mail: alina290510@mail.ru

Имашева Гульнар Махмутовна	Техника ғылымдарының докторы, профессор «Көліктік инженерия және логистика мектебі», Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: g.imasheva@satbayev.university
Болаткызы Салтанат	Э.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан, E-mail: Saltab@mail.ru

Сведение об авторах

Нуржаубаев Мейрам Маханович	Доктарант PhD, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. Сатпаева, Алматы, Казахстан, E-mail: make1370@mail.ru
Избаирова Алия Сериковна	К.т.н., ассоциированный профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. Сатпаева, Алматы, Казахстан E-mail: a.izbairova@satpayev.university
Сарсенбаева Лунара Хаберовна	Магистр, Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет, Уральск, Казахстан, E-mail: alina290510@mail.ru
Имашева Гульнар Махмутовна	Доктор технических наук, профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. Сатпаева, Алматы, Казахстан E-mail: g.imasheva@satbayev.university
Болаткызы Салтанат	К.э.н., ассоциированный профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. Сатпаева, Алматы, Казахстан E-mail: Saltab@mail.ru

Information about the authors

Nurzhaubayev Meiram	PhD student, K. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: make1370@mail.ru
Izbairova Aliya	candidate of technical sciences, associate professor, K. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: a.izbairova@satpayev.university
Sarsenbayeva Lunara	Master's degree, West Kazakhstan innovation and Technology University, Uralsk, Kazakhstan, E-mail: alina290510@mail.ru
Imasheva Gulnar	Doctor of Technical Sciences, Professor, K. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: g.imasheva@satbayev.university
Bolatkyzy Saltanat	Candidate of Economic Sciences, associate professor, K. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: Saltab@mail.ru