https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-11

МРНТИ: 50.47.00

CC BY 4.0
Check for updates

А.Н. Бақытжанов*, Д.К. Сатыбалдина[1], А.Ж. Закарина[1], Н.Б. Шмитов[1], Н.М. Тешебаев[2]
[1]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010008, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтбаев көшесі, 2
[2]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Әл-Фараби даңғылы, 71
*e-mail: bakytzhanovansar4@gmail.com

КҮЛ МӨЛШЕРІ ЖОҒАРЫ ОТЫНДЫ ЖАҒУ КЕЗІНДЕ БАРАБАНДЫ БУ ҚАЗАНДЫҒЫНЫҢ ЖҰМЫС РЕЖИМІН ОТЫН ШЫҒЫНЫНЫҢ МИНИМУМЫ КРИТЕРИЙІ БОЙЫНША ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Аңдатпа: *Жұмыста жұмыс күлділігі A^r 47%-ға дейін жететін экибастуз көмірін жағатын БҚЗ-320-140 ПТ барабанды бу қазандығының отын шығынын оңтайландыру мәселесі шешілді. Отын жұмсалуын, бу қыздырғыштан кейінгі артық оттегіні және қыздырылған будың артық шығарылымын тізбектеп азайтатын үш кезеңді лексикографиялық сызықтық бағдарламалау есебі ұсынылды. Есеп MATLAB ортасында linprog функциясы мен dual-simplex алгоритмі арқылы шешілді; бу шығару процесінің инкременттік формадағы сызықтық регрессиялық моделі пайдаланылды. Режим параметрлеріне қыздырылған будың температурасы (540-555°C), оттегі мөлшері (≥ 4,8 %) және бу шығарылымы (260-340 т/сағ) бойынша теңсіздік түріндегі технологиялық шектеулер қойылды. Параметрлердің рұқсат етілген шекаралары Астана қ. ТЭЦ-2 қазандығының 2023 жылғы қыркүйек–қазан айларындағы 1276 сағаттық жазбасын статистикалық өңдеу нәтижелері бойынша анықталды. Алынған нәтижелер бойынша отын шығыны қосымша күрделі шығынсыз сағатына 0,331 т-ға азайып, жылына 21,1 млн теңге үнемделеді. Қосымша нәтиже ретінде конвективті жылу алмасу беттері арқылы абразивті күл уносы сағатына 134 кг-ға, яғни жылыту маусымына шамамен 1005 т-ға кемиді, бұл экологиялық жүктемені айтарлықтай төмендетеді. Ұсынылған әдіс басқа барабанды қазандықтарға бейімделіп, нақты уақыттағы автоматтандырылған режимдік басқару жүйесіне енгізілуі мүмкін, бұл оны өндірісте практикалық қолдануға жарамды етеді.*

Түйін сөздер: *бу қазандығы, БҚЗ-320-140, экибастуз көмірі, күлі жоғары отын, абразивті тозу, оңтайлы басқару, сызықтық бағдарламалау, MATLAB.*

Кіріспе

Қазақстандағы электр энергиясының 70%-дан астамы жылу электр орталықтарында өндіріледі. Осы көлемнің басым бөлігі экибастуз тас көмірімен жұмыс істейтін шаңкөмірлі қазандық қондырғыларына тиесілі. Экибастуз көмірі абразивтілігі жағынан дүние жүзіндегі ең қиын энергетикалық отындардың қатарында: күлділігі A^r 38-ден 47%-ға дейін жетеді, жану жылуы $Q_н^r$ шамамен 16,8 МДж/кг-ды құрайды, ал күлдегі SiO_2 үлесі 45-78% аралығында болады [1, 2].

Шаңкөмірлі қазандықтардың пайдалану практикасында жылу алмасу қабаттарының тозуы өзекті мәселе болып қала береді. Түтін газдарындағы қатты күл түйіршіктері бу қыздырғыш, экономайзер және түтікті ауа қыздырғыш құбырларына соғылып, олардың қабырғаларын үздіксіз жұқартады. Тозу қарқындылығы газ ағынының жылдамдығына текше дәрежеде, ал күл мөлшеріне сызықтық тәуелді. Осыдан шығатын қорытынды қарапайым: отын жағудың кез келген кемуі тозу үрдісін баяулатады [1, 3].

Күл жинақталуын бақылау мен болжау саласында белсенді зерттеулер жүргізілуде. Атап айтқанда, [4] жұмысында CEEMDAN сигнал ыдырауы NAR нейрондық желісімен біріктіріліп, 300 МВт қазандықтың экономайзеріндегі күл қабатын болжау моделі жасалды. Циркуляциялық қайнау қабатты қазандыққа арналған [5] зерттеуде Байес тәсілдері мен дірілдік сенсорлық деректерді ұштастыратын гибридті мониторинг жүйесі ұсынылды. Терең оқыту мүмкіндіктерін тереңірек пайдаланған [6] жұмыс CEEMDAN, KPCA және назар механизмі бар encoder-decoder архитектурасын жылу беру тиімділігін бағалауға бейімдеді.

©А.Н. Бақытжанов, Д.К. Сатыбалдина, А.Ж. Закарина, Н.Б. Шмитов, Н.М. Тешебаев, 2026

Сонымен қатар, [7] мақаласында CNN-BiGRU гибридті моделі арқылы қазандық жану жүйесі NO_x мен жылу тиімділігі бойынша бір мезгілде оңтайландырылды.

Аталған зерттеулердің көбі деректерге негізделген (data-driven) тәсілдерді қолданады, олар жоғары дәлдікті қамтамасыз етсе де, күрделі есептеу ресурстарын, үлкен деректер жиынтығын және арнайы аппараттық қамтамасыз етуді талап етеді. Алайда, стационарлы жұмыс режимі бар нақты өнеркәсіптік қазандыққа сызықтық регрессия мен сызықтық бағдарламалауды біріктіре отырып, отын шығынын оңтайландыру мәселесі бүгінгі күнге дейін тиісті деңгейде қарастырылмаған. Мұндай тәсілдің артықшылығы - есептеу қарапайымдылығы, нәтижелердің түсініктемелілігі және қосымша жабдықсыз іске асырылуы [8].

Жұмыстың негізгі мақсаты – барабанды бу қазандығына арналған оңтайлы басқару алгоритмін жасап, оны бағдарламалық іске асыру. Алгоритм берілген технологиялық шектеулер шеңберінде тұтынушыларға жеткізілетін бу бірлігіне шаққанда отын шығынының ең аз мәнін қамтамасыз етуге тиіс. Экибастуз көмірінің ерекшелігін ескерсек, отын жағуды азайту екі нәтиже бере алады: біріншіден, тікелей ақша үнемі; екіншіден, конвективті қабаттар арқылы ұшатын абразивті күл мөлшерін кемітіп, олардың тозу жылдамдығын баяулату.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы бу қалыптастыру процесінің қосымша сызықтық регрессиялық моделін және сызықтық бағдарламалау мәселесінің үш сатылы лексикографиялық қойылымын бірлесіп пайдалануға негізделген бу қазандығының жұмыс режимдерін оңтайландырудың жаңа тәсілін әзірлеу болып табылады. Негізінен сызықтық емес модельдерге, нейрондық желілерге, терең оқыту әдістеріне немесе объектінің күрделі физикалық модельдеріне негізделген бу қазандықтарының жұмыс режимдерін оңтайландырудың қолданыстағы әдістерінен айырмашылығы, ұсынылған тәсіл технологиялық параметрлердің себеп-салдарлық байланыстарының С-графигі негізінде құрылған және пайдалану деректері бойынша анықталған сызықтық модельді қолданады. Әзірленген әдістің қосымша ерекшелігі-нақты пайдалану деректерінің 5-95 процентиль аралығы бойынша параметрлердің өзгеруінің рұқсат етілген диапазондарын анықтау, бұл шешімнің практикалық қолданылуын сақтай отырып, оның тұрақтылығын қамтамасыз етеді. Процесс моделін лексикографиялық оңтайландырумен біріктіру ресурстарды қажет ететін оқыту алгоритмдерін қолданбай отын шығынын азайтуды қамтамасыз ететін өнеркәсіптік бу қазандығының жұмыс режимдерін есептеуіш тиімді анықтауға мүмкіндік береді және әдісті қолданыстағы автоматтандырылған басқару жүйелерінде тікелей пайдалануға жарамды етеді.

Мақала келесідей ұйымдастырылған. 2-бөлімде зерттеу объектісі сипатталып, математикалық модель мен оңтайландыру есебінің қойылымы келтіріледі. 3-бөлімде MATLAB ортасындағы есептеу нәтижелері ұсынылады. 4-бөлімде экономикалық тиімділік пен абразивті тозуды кемітуге байланысты нәтижелер талқыланады. 5-бөлімде қорытынды тұжырымдалады.

Зерттеу жағдайлары мен әдістері

Сызықтық бағдарламалау есебінің қойылымы мен шешу әдісі

Сызықтық бағдарламалау (СБ) есебі келесі түрде тұжырымдалады: сызықтық мақсат функциясының минимумын (немесе максимумын) сызықтық теңсіздіктер мен теңдіктерден тұратын шектеулер жүйесін қанағаттандыратын айнымалылар жиынтығында табу. Жалпы түрдегі СБ есебі матрицалық жазбада келесідей жазылады. Табу қажет:

$$min\ c^{\mathrm{T}} * x$$

келесі шарттар орындалғанда:

$$A * x \leq b,\ A_{\mathrm{eq}} * x = b_{\mathrm{eq}},\ lb \leq x \leq ub$$

мұнда x – оңтайландыру айнымалыларының векторы (n×1); c – мақсат функциясының коэффициенттер векторы; A, b – теңсіздік шектеулерінің матрицасы мен векторы;$A_{\mathrm{eq}}, b_{\mathrm{eq}}$ – теңдік шектеулерінің матрицасы мен векторы; lb, ub - айнымалылардың төменгі және жоғарғы шекаралары.

Сызықтық бағдарламалау есебін келесідей де тұжырымдауға болады. Табу қажет:

$$max(c_1x_1 + c_2x_2 + \ldots + c_{\mathrm{n}}x_{\mathrm{n}})$$

немесе

$$min(c_1x_1 + c_2x_2 + \ldots + c_nx_n)$$

келесі шарттар орындалған жағдайда:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1n}x_n \leq b_1$$
$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \ldots + a_{2n}x_n \leq b_2$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \ldots + a_{mn}x_n \leq b_m$$
$$x_1 \geq 0,\ x_2 \geq 0,\ \ldots,\ x_n \geq 0$$

Бұл жағдайда барлық шектеулер теңсіздік түрінде болады. Кейде оларды араластыруға болады, яғни теңсіздіктер мен теңдіктер бірге:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1n}x_n \leq b_1$$
$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \ldots + a_{2n}x_n = b_2$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \ldots + a_{mn}x_n \geq b_m$$

Симплекс әдісі – сызықтық бағдарламалау есептерін шешуге арналған классикалық итерациялық алгоритм. Оның негізгі идеясы: рұқсат етілген облыс көпжақ (полиэдр) болғандықтан, оңтайлы шешім міндетті түрде осы полиэдрдың төбелерінің бірінде орналасады. Алгоритм бастапқы рұқсат етілген төбеден бастап, әр итерацияда мақсат функциясын жақсартатын көрші төбеге ауысады. Ешбір көрші төбе мақсат функциясын жақсартпағанда - оптимум табылды деп саналады.

Теңсіздік шектеулерін теңдікке айналдыру үшін бос айнымалылар $x_{n+1}, x_{n+2}, \ldots, x_{n+m}$ енгізіледі. Осылайша теңсіздік:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1n}x_n \leq b_1$$
$$a_{11}x_1 + \ldots + a_{1n}x_n + x_{n+1} = b_1, \quad \textit{мұнда } x_{n+1} \geq 0$$

Бұл формадағы есеп кеңейтілген деп аталады.

MATLAB ортасындағы linprog функциясы dual-simplex алгоритмін іске асырады - бұл классикалық симплекс әдісінің қосарлы (дуальді) нұсқасы, ол ірі өлшемді сирек матрицалы есептерде тиімді жұмыс істейді. linprog функциясының шақыру синтаксисі:

$$x = linprog(c, A, b, A_{eq}, b_{eq}, lb, ub)$$

мұнда аргументтер жоғарыда сипатталған стандартты LP есебінің компоненттеріне сәйкес келеді [9].

Процестің математикалық моделі және қазандық жұмыс режимін оңтайландыру есебі

Зерттеу объектісі ретінде Барнаул қазандық зауытының («Сібенергомаш») өнімі - БҚЗ-320-140 ПТ бу қазандығы алынды. Қазандық бір барабанды, тік-түтікті, табиғи айналымды, П-тәріздес компоновкалы, қатты шлак шығарумен жұмыс істейді; жобалық бу өнімділігі 320 т/сағ, қыздырылған будың қысымы 140 кгс/см², температурасы 550°С, номиналды ПӘК шамамен 90 %. Зерттеу Астана қ. ТЭЦ-2-де орнатылған, СС маркалы экибастуз көмірін жағатын қазандық қондырғысының эксплуатациялық деректері негізінде жүргізілді.

Стационарлы режимдегі бу шығару процесінің математикалық моделі қазандық параметрлерінің С-графы негізінде құрылымдық-параметрлік сәйкестендіру әдісі арқылы алынды [8]. Регрессиялық талдау нәтижесінде процестің параметрлерін өзара байланыстыратын сызықтық қатынастар алынды:

$$B_о = 0{,}0435 * O_2(с) + 0{,}0587 * O_2(о) + 1{,}313 * D_{қ.б} + 0{,}0987 * P_{ББЖ} - 0{,}00162 * G_а \quad (1)$$
$$O_2 = 0{,}000919 * G_а + 0{,}274 * B_о + 0{,}0157 * P_{ББЖ} - 0{,}713 * D_{қ.б} \quad (2)$$
$$D_{қ.б} = 0{,}00139 * G_а - 0{,}0029 * G_{қ.с} - 0{,}0414 * T_{қ.с} + 0{,}00588 * P_{қ.с} + 0{,}0678 * B_о - D_{ө.қ} \quad (3)$$
$$T_{қ.б} = -25{,}329 * B_о + 4{,}2 * P_{ББЖ} + 4{,}19 * D_{қ.б} - 0{,}0199 * G_{қ.с} \quad (4)$$

Мұнда $B_о$ – отын шығыны, т/сағ; O_2 - бу қыздырғыштан кейінгі оттегі мөлшері, %; $D_{қ.б}$ – қыздырылған будың артық шығарылымы, т/сағ; $T_{қ.б}$ – қыздырылған будың температурасы, °С; $G_а$ – үрлеу ауасының шығыны, м³/сағ; $G_{қ.с}$ – қоректік судың шығыны, т/сағ; $D_{ө.қ}$ – өзіндік қажеттіліктерге кететін бу шығыны, т/сағ; $P_{ББЖ}$ – барабандағы қысым.

(1)-(4) теңдеулерімен ұсынылған алынған регрессиялық модельдің барабарлығы қазандықтың номиналды есептеу режиміндегі ауытқулардың шамасы бойынша бағаланады. Ол үшін Шығыс параметрлерінің өлшенген мәндері (1)-(4) теңдеулерімен есептелген мәндермен салыстырылды. Бағалау нәтижелері 1-кестеде келтірілген. Модельдің барлық теңдеулердегі салыстырмалы қателігі 2,5% - дан аспайды (орта есеппен шамамен 1,1 %), бұл

сызықтық регрессиялық модельдің барабарлығын және оның жұмыс нүктесінің маңындағы қазандықтың жұмыс режимін оңтайландыруға жарамдылығын растайды.

Кесте 1 – Регрессиялық модельдің номиналды режимдегі адекваттылығын бағалау

Шама (теңдеу)	Өлшенген	Есептік	Δ	δ, %
Bo, т/сағ (1)	43,566	42,843	−0,723	−1,66
O_2, % (2)	6,100	5,952	−0,148	−2,42
Dқ.б, т/сағ (3)	260,00	259,09	−0,91	−0,35
Тқ.б, °C (4)	547,0	547,7	+0,74	+0,14

Оңтайлы басқару есебі мынадай түрде тұжырымдалады: $G_{\text{а}}$, $G_{\text{қ.с}}$, $D_{\text{ө.қ}}$, $B_{\text{о}}$ басқарушы әсерлерінің мәндерін табу қажет, олар оттегі мен будың артық мөлшерін минимумға түсіре отырып, отын шығынының ең аз мәнін қамтамасыз етсін. Есептің көп критерийлі сипатын ескере отырып, ол лексикографиялық қойылымда үш кезеңде шешіледі:

$$B_{\text{о}} \rightarrow min \quad (5)$$

$$O_2 \rightarrow min, \quad \text{шарт: } B_{\text{о}} \leq B_0^* + \varepsilon_1 \quad (6)$$

$$D_{\text{қ.б}} \rightarrow min, \quad \text{шарт: } B_{\text{о}} \leq B_0^* + \varepsilon_1,\ O_2 \leq O_2^* + \varepsilon_2 \quad (7)$$

Әр кезеңде регрессиялық модельдің (1)-(3) теңдеулері инкременттік формадағы теңдік шектеулері ретінде қолданылады. Бұған қосымша, қазандықтың қауіпсіз жұмыс істеуін қамтамасыз ету мақсатында технологиялық теңсіздік шектеулері қойылады:

$$O_2 \geq 4{,}8\ \% \quad (8)$$

$$260 \leq D_{\text{қ.б}} \leq 340\ \text{т/сағ} \quad (9)$$

$$540 \leq T_{\text{қ.б}} \leq 555\ °C \quad (10)$$

ұнда $T_{\text{қ.б}}$ регрессиялық модельдің (4) теңдеуімен есептеледі. (8)-(10) шектеулер қыздырылған будың температурасын, оттегі мөлшерін және бу шығарылымын технологиялық рұқсат етілген аралықта ұстап тұруды қамтамасыз етеді. Бұл теңсіздіктер linprog функциясының $A_{ub} * x \leq b_{ub}$ аргументтері арқылы беріледі.

Шағын допусктар ε_1, ε_2 алдыңғы кезеңде табылған оптимумнан рұқсат етілген ауытқу ретінде түсіндіріледі; олар полиэдр төбесінің ауысуын жою үшін енгізілді, сандық мәндері ε_1 = 0,05 және ε_2 = 0,01 деп қабылданды.

Үш кезеңді оңтайландыру MATLAB ортасында Optimization Toolbox пакетінің linprog функциясы (dual-simplex алгоритмі) көмегімен бағдарламалық іске асырылды [9]. Регрессиялық модельдің (1)-(3) теңдеулері $A_{eq} * x = A_{eq} * x_0$ инкременттік түрінде қолданылды, бұл номиналды жұмыс нүктесі x_0 маңындағы модельдің қалдық қателігін дұрыс ескеруге мүмкіндік береді. Басқарылатын параметрлердің технологиялық шекаралары 2023 жылдың қыркүйек-қазан айларындағы қазандық жұмысының 1276 сағаттық жазбасын статистикалық өңдеу (5-ші және 95-ші процентіктер) арқылы анықталды.

Зерттеу нәтижелері

Оңтайландыру кезеңдері бойынша алынған технологиялық параметрлердің мәндері 2-кестеде келтірілген.

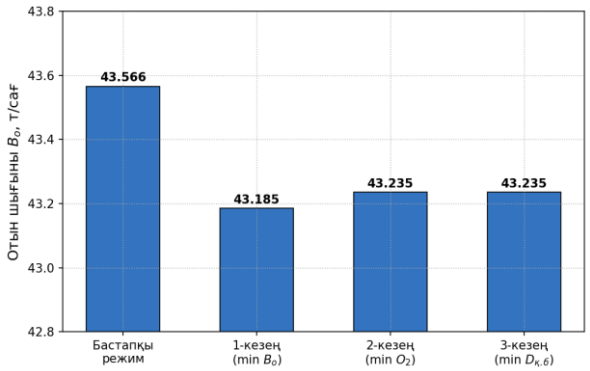
Кесте 2 – Оңтайландыру кезеңдері бойынша жұмыс режимінің параметрлері

Параметр	Бір.	Бастапқы	1-кезең	2-кезең	3-кезең
Отын шығыны $B_{\text{о}}$	т/сағ	43,566	43,185	43,235	43,235
Оттегі O_2	%	6,100	6,196	6,181	6,133
Артық бу $D_{\text{қ.б}}$	т/сағ	260,0	259,5	259,5	258,0
Ауа шығыны $G_{\text{а}}$	м³/сағ	192 901	192 730	192 700	191 484
Қоректік су $G_{\text{қ.с}}$	т/сағ	260,0	275,0	275,0	275,0
Бу ө.қ. $D_{\text{ө.қ}}$	т/сағ	2,00	2,19	2,16	1,97
Температура $T_{\text{қ.б}}$	°C	547	555,0	553,7	547,5

2-кестеден көрініп тұрғандай, бірінші кезеңде отын шығыны бастапқы 43,566 т/сағ мәнінен 43,185 т/сағ-ға дейін төмендейді, бұл ретте $T_{\text{қ.б}}$ температурасы жоғарғы рұқсат шегіне (555 °C) жетеді. Екінші кезеңде бу қыздырғыштан кейінгі оттегінің артық мөлшері нәзік түзетіледі (O_2 6,196-дан 6,181 %-ға кемиді). Үшінші кезең қыздырылған будың артық

шығарылымын $D_{қ.б}$ (259,5-тен 258,0 т/сағ-ға) кемітеді, ал $T_{қ.б}$ 547,5 °С-ға дейін түсіп, 540-555 °С шегінде қалады. Отын шығынын жалпы кемітуі ΔB_o = 0,331 т/сағ, бастапқы деңгейден шамамен 0,76 % құрайды.

1-суретте оңтайландырудың үш кезеңі бойынша отын шығынының кемуі көрсетілген. Әрбір кезеңнің нәтижесі алдыңғысынан айқын ерекшеленеді, бұл лексикографиялық қойылымның тиімділігін дәлелдейді.



Сурет 1 – Оңтайландыру кезеңдері бойынша отын шығыны Во

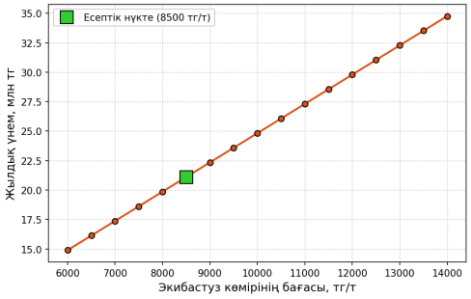
Ғылыми нәтижелерді талқылау

Экибастуз көмірінің көтерме бағасы 2025-2026 жылдардағы салалық статистика бойынша 8000-10000 тг/т аралығында; осы есептерде орташа мәні 8500 тг/т деп қабылданды. Қазандықтың жылдық жұмыс қоры h = 7500 сағ (жоспарлы жөндеулерді ескергендегі базалық режимнің типтік мәні) болғанда, сағаттық және жылдық үнем:

$$\Delta S_{\text{сағ}} = \Delta B_{\text{о}} * \text{Баға} = 0{,}331 * 8500 \approx 2814 \text{ тг/сағ} \quad (11)$$

$$\Delta S_{\text{жыл}} = \Delta S_{\text{сағ}} * \text{h} = 2814 * 7500 \approx 21{,}1 \text{ млн тг/жыл} \quad (12)$$

2-суретте көрсетілгендей, көмір бағасы 6000-14000 тг/т аралығында өзгерген кезде жылдық экономикалық тиімділік 14,9-дан 34,7 млн теңгеге дейін ауытқиды. Бұл тиімділік қосымша күрделі шығынсыз, тек бар жабдықтың режимдік параметрлерін оңтайландыру есебінен қол жеткізіледі.



Сурет 2 – Экибастуз көмірінің бағасына үнемнің сезімталдығы

Күлі жоғары экибастуз көміріне қатысты, отын шығынының кемуі тікелей экономикалық ғана емес, елеулі эксплуатациялық тиімділікке ие – конвективті жылу алмасу қабаттары арқылы абразивті күл уносының азаюы. Күл уносының сағаттық массалық шығыны мына өрнекпен бағаланады [1, 3]:

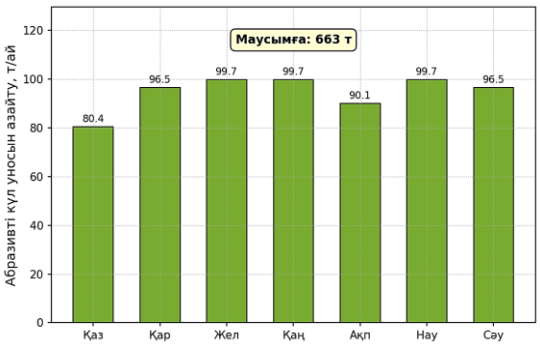
$$G_{\text{күл}} = B_{\text{о}} * A^{\text{r}} * \alpha_{\text{ұш}} \quad (13)$$

мұнда A^{r} - отынның жұмыс күлділігі (A^{r} = 0,45 деп қабылданды); $\alpha_{\text{ұш}}$ - топкадан ұшатын күлдің үлесі (қатты шлак шығаратын шаңкөмірлі қазандықтар үшін $\alpha_{\text{ұш}}$ ≈ 0,90). Онда режимді оңтайландыру кезіндегі күл уносының сәйкес кемуі:

$$\Delta G_{\text{күл}} = \Delta B_{\text{о}} * A^{\text{r}} * \alpha_{\text{ұш}} = 0{,}331 * 0{,}45 * 0{,}90 \approx 0{,}134 \text{ т/сағ} \quad (14)$$

яғни сағатына шамамен 134 кг. Ұзақтығы 7500 сағ болатын жылыту маусымында конвективті жылу алмасу қабаттары арқылы шамамен 1005 тонна абразивті күл кем өтеді.

3-суретте жылыту маусымының әрбір айындағы абразивті күл уносының кемуі көрсетілген. Абразивті тозу қарқындылығының газ ағыны жылдамдығына текше тәуелділігін және күл концентрациясына сызықтық тәуелділігін ескерсек, отын шығынының кемуі мен онымен қоса түтін газдарының массалық шығынының азаюы бу қыздырғыш, экономайзер және түтікті ауа қыздырғыш құбырларының тозу жылдамдығының одан да елеулі салыстырмалы кемуіне алып келеді [1, 10]. Бұл жылу алмасу қабаттарының жөндеу аралығын ұзартады және қазандық қондырғысының құбыр жарылулары мен жыланкөздерге байланысты апаттық тоқтаулар жиілігін азайтады.



Сурет 3 – Жылыту маусымының айлары бойынша абразивті күл уносын азайту

Алынған нәтижелерді қазандық жұмыс режимін оңтайландыруға арналған заманауи зерттеулермен салыстыруға болады. [4] және [6] жұмыстарда CEEMDAN-NAR және назар механизмі бар encoder-decoder архитектуралары негізінде жылу беру тиімділігі мен күл жинақталуы жоғары дәлдікпен болжанады; [7] мақалада CNN-BiGRU гибридті моделі NOx шығарылымы мен жылу тиімділігін бір мезгілде оңтайландырады, ал [11] зерттеуде циркуляциялық қайнаған қабатты қазандықтың негізгі басқару параметрлері машиналық оқыту әдістерімен таңдалады. Аталған тәсілдер жоғары дәлдікке қол жеткізгенімен, елеулі көлемдегі оқыту деректерін, есептеу ресурстарын, кейде қосымша сенсорлық жабдықты талап етеді әрі алынған модельдердің физикалық интерпретациясы шектеулі болады.

Осы зерттеуде ұсынылған сызықтық регрессия мен лексикографиялық сызықтық бағдарламалауды ұштастыратын тәсіл, аталған әдістермен салыстырғанда, есептеу жағынан едәуір қарапайым, толық интерпретацияланады және қосымша жабдықсыз, тек қолданыстағы телеметрия негізінде жүзеге асырылады. [3] жұмыста ұсынылған оттегі-температуралық реттеу арқылы шлактануды болдырмау тәсілінен айырмашылығы - мұнда режим құрылымдық өзгеріссіз, тікелей отын шығынының минимумы критерийі бойынша оңтайландырылады, ал абразивті күл уносының азаюы қосымша нәтиже ретінде алынады. Осылайша ұсынылған әдіс дәлдік пен есептеу қарапайымдылығы арасындағы практикалық теңгерімге бағытталып, оны жедел (real-time) режимде жұмыс істейтін автоматтандырылған басқару жүйелеріне енгізуге ыңғайлы етеді.

Қорытынды

Зерттеу барысында MATLAB ортасында linprog функциясы арқылы іске асырылған үш кезеңді сызықтық бағдарламалау алгоритмі барабанды бу қазандығының жұмыс режимін оңтайландыруға тиімді құрал бола алатындығы дәлелденді. Алгоритм отын шығынын, артық оттегіні және артық бу өндіруін бір мезгілде кемітеді, бұл ретте технологиялық шектеулер бұзылмайды.

Күлділігі 45% шамасындағы экибастуз көмірімен жұмыс істейтін БҚЗ-320-140 ПТ қазандығына қолданғанда, отын шығыны сағатына 0,331 т-ға кемиді. Бұл жылына 21,1 млн теңге шамасында үнемге баламалы. Маусымдық есеппен алғанда, конвективті қабаттар арқылы ұшатын абразивті күл 1005 тоннаға азаяды, бұл конвективті жылу алмасу беттерінің қызмет ету ресурсын арттыруға мүмкіндік береді.

Алынған нәтижелер сызықтық бағдарламалау әдістерін күлі жоғары отынмен жұмыс жасайтын энергетикалық қазандық қондырғыларына арналған интеллектуалды оңтайлы басқару жүйелерін жасауда қолдануға болатындығын растайды.

Ұсынылған алгоритмнің практикалық енгізілу перспективалары теплоэнергетикалық объектілердің автоматтандырылған басқару жүйелерімен (АБЖ ТП, SCADA) тікелей байланысты. Алгоритмнің есептеу қарапайымдылығы мен жоғары жылдамдығы оны бақылаушы (supervisory, set-point) деңгейде іске асыруға мүмкіндік береді: SCADA/АБЖ телеметриясынан алынған ағымдағы параметрлер бойынша оңтайлы тапсырма мәндері (отын шығыны, артық ауа, бу шығарылымы) есептеліп, төменгі деңгейдегі реттеу контурларына беріледі. Болашақ зерттеу бағыттары ретінде: регрессиялық модельді жаңа эксплуатациялық деректер бойынша мерзімді қайта баптау (адаптивті сәйкестендіру); алгоритмді жүктеменің айнымалы режимдеріне бейімдеу; басқа типтегі барабанды қазандықтарға тарату; сондай-ақ ұсынылған сызықтық тәсілді деректерге негізделген болжау модельдерімен біріктіріп, гибридті оңтайлы басқару жүйесін құру көзделеді. Мұндай енгізу қазандық қондырғысының энергетикалық тиімділігін арттырып, отын мен эксплуатациялық шығындарды төмендетуге және конвективті жылу алмасу беттерінің қызмет ету мерзімін ұзартуға мүмкіндік береді.

Әдебиеттер тізімі

1. Абразивный износ конвективных поверхностей энергетического котлоагрегата золой экибастузского угля / Л.В. Белоглазова и др. // Технические науки – от теории к практике. – 2016. – № 11. – С. 73-80.
2. A comprehensive review on efficient utilization methods of High-alkali coals combustion in boilers / C. Tang et al // Fuel. – 2022. – Vol. 316. – Article 123269. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123269.
3. Numerical simulation of engineering application for a novel oxygen-temperature regulation combustion technology preventing fouling in high-alkali coal firing / S. Chen et al // Applied Thermal Engineering. – 2025. – Vol. 259. – Article 124923. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124923.
4. Heat Transfer Efficiency Prediction of Coal-Fired Power Plant Boiler Based on CEEMDAN-NAR Considering Ash Fouling / Y. Shi et al // Energies. – 2021. – Vol. 14, № 13. – Article 4000. https://doi.org/10.3390/en14134000.
5. Fouling Monitoring in a Circulating Fluidized Bed Boiler Using Direct and Indirect Model-Based Analytics / E. Ikonen et al // Fuel. – 2023. – Vol. 346. – Article 128341. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128341.
6. Deep Learning-Based Approach for Heat Transfer Efficiency Prediction with Deep Feature Extraction / Y. Shi et al // ACS Omega. – 2022. – Vol. 7, № 35. – P. 31013-31035. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03052.
7. Intelligent Deep Learning Modeling and Multi-Objective Optimization of Boiler Combustion System in Power Plants / C. Huang et al // Processes. – 2025. – Vol. 13, № 8. – Article 2340. https://doi.org/10.3390/pr13082340.
8. Большаков Ф.Г. Синтез оптимального по минимуму расхода топлива алгоритма управления паровым котлом / Ф.Г. Большаков. – Братск: БрГУ, 2001. – 132 с.
9. MATLAB Optimization Toolbox. User's Guide. Linear Programming (linprog). – The MathWorks, Inc., 2024. https://www.mathworks.com/help/optim/ug/linprog.html.
10. Ash melting behaviors of high-sodium coal and its co-combustion with coal gangue to inhibit slagging / L. Zhang et al // Fuel. – 2024. – Vol. 367. – Article 131537. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131537.
11. Optimization of circulating fluidized bed boiler combustion key control parameters based on machine learning / L. Han et al // Energies. – 2023. – Vol. 16, № 15. – Article 5674. https://doi.org/10.3390/en16155674.

References

1. Abrazivnyi iznos konvektivnykh poverkhnostei ehnergeticheskogo kotloagregata zoloi ehkibastuzskogo uglya / L.V. Beloglazova i dr. // Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike. – 2016. – № 11. – S. 73-80. (in Russian).
2. A comprehensive review on efficient utilization methods of High-alkali coals combustion in boilers / C. Tang et al // Fuel. – 2022. – Vol. 316. – Article 123269. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123269. (in English).

3. Numerical simulation of engineering application for a novel oxygen-temperature regulation combustion technology preventing fouling in high-alkali coal firing / S. Chen et al // Applied Thermal Engineering. – 2025. – Vol. 259. – Article 124923. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124923. (in English).
4. Heat Transfer Efficiency Prediction of Coal-Fired Power Plant Boiler Based on CEEMDAN-NAR Considering Ash Fouling / Y. Shi et al // Energies. – 2021. – Vol. 14, № 13. – Article 4000. https://doi.org/10.3390/en14134000. (in English).
5. Fouling Monitoring in a Circulating Fluidized Bed Boiler Using Direct and Indirect Model-Based Analytics / E. Ikonen et al // Fuel. – 2023. – Vol. 346. – Article 128341. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128341. (in English).
6. Deep Learning-Based Approach for Heat Transfer Efficiency Prediction with Deep Feature Extraction / Y. Shi et al // ACS Omega. – 2022. – Vol. 7, № 35. – P. 31013-31035. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03052. (in English).
7. Intelligent Deep Learning Modeling and Multi-Objective Optimization of Boiler Combustion System in Power Plants / C. Huang et al // Processes. – 2025. – Vol. 13, № 8. – Article 2340. https://doi.org/10.3390/pr13082340. (in English).
8. Bol'shakov F.G. Sintez optimal'nogo po minimumu raskhoda topliva algoritma upravleniya parovym kotlom / F.G. Bol'shakov. – Bratsk: BrGU, 2001. – 132 s. (in Russian).
9. MATLAB Optimization Toolbox. User's Guide. Linear Programming (linprog). – The MathWorks, Inc., 2024. https://www.mathworks.com/help/optim/ug/linprog.html. (in English).
10. Ash melting behaviors of high-sodium coal and its co-combustion with coal gangue to inhibit slagging / L. Zhang et al // Fuel. – 2024. – Vol. 367. – Article 131537. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131537. (in English).
11. Optimization of circulating fluidized bed boiler combustion key control parameters based on machine learning / L. Han et al // Energies. – 2023. – Vol. 16, № 15. – Article 5674. https://doi.org/10.3390/en16155674. (in English).

А.Н. Бакытжанов*, Д.К. Сатыбалдина[1], А.Ж. Закарина[1], Н.Б. Шмитов[1], Н.М. Тешебаев[2]
[1]Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
010008, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2
[2]Казахский национальный университет им. аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71
*e-mail: bakytzhanovansar4@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ БАРАБАННОГО ПАРОВОГО КОТЛА ПРИ СЖИГАНИИ ВЫСОКОЗОЛЬНОГО ТОПЛИВА ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА РАСХОДА ТОПЛИВА

В работе решена задача оптимизации расхода топлива барабанного парового котла БКЗ-320-140 ПТ, работающего на экибастузском угле с рабочей зольностью A^r до 47 %. Предложена трёхэтапная лексикографическая задача линейного программирования для последовательной минимизации расхода топлива, избытка кислорода за пароперегревателем и избыточной выработки перегретого пара. Задача решена в среде MATLAB с использованием функции linprog и алгоритма dual-simplex на основе линейной регрессионной модели процесса парообразования в инкрементальной форме. На параметры режима наложены технологические ограничения в виде неравенств по температуре перегретого пара (540-555°C), содержанию кислорода (≥ 4,8%) и выработке пара (260-340 т/ч). Допустимые диапазоны параметров определены по результатам статистической обработки 1276 часовых записей работы котлоагрегата ТЭЦ-2 г. Астаны за период сентябрь-октябрь 2023 г. Полученные результаты показывают, что расход топлива без дополнительных капитальных затрат снижается на 0,331 т/ч, что обеспечивает годовую экономию 21,1 млн тенге. В качестве дополнительного результата достигается снижение уноса абразивной золы через конвективные поверхности нагрева на 134 кг/ч, или около 1005 т за отопительный сезон, что существенно снижает экологическую нагрузку. Предложенный метод может быть адаптирован для других барабанных котлов и внедрён в автоматизированную систему режимного управления в реальном времени, что делает его пригодным для практического применения в производстве.

Ключевые слова: *паровой котёл, БКЗ-320-140, экибастузский уголь, высокозольное топливо, абразивный износ, оптимальное управление, линейное программирование, MATLAB.*

A.N. Bakytzhanov[*], D.K. Satybaldina[1], A.Zh. Zakarina[1], N.B. Shmitov[1], N.M. Teshebayev[2]
[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010008, Republic of Kazakhstan, Astana, 2 Satpayev St.
[2]Al-Farabi Kazakh National University, 050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 71 Al-Farabi Ave.
e-mail: bakytzhanovansar4@gmail.com

OPTIMIZATION OF THE OPERATING MODE OF A DRUM STEAM BOILER BURNING HIGH-ASH FUEL BY THE CRITERION OF MINIMUM FUEL CONSUMPTION

This paper addresses the fuel consumption optimization problem for a BKZ-320-140 PT drum steam boiler burning Ekibastuz coal with working ash content A^r up to 47%. A three-stage lexicographic linear programming problem is proposed for the sequential minimization of fuel consumption, excess oxygen downstream of the superheater, and excess superheated steam production. The problem is solved in MATLAB using the linprog function and the dual-simplex algorithm, based on an incremental linear regression model of the steam generation process. Technological inequality constraints are imposed on the operating parameters: superheated steam temperature (540-555 °C), oxygen content (≥ 4.8%), and steam output (260-340 t/h). Permissible parameter ranges are determined from statistical processing of 1276 hourly records of the CHP-2 Astana boiler unit for September-October 2023. The results show that fuel consumption is reduced by 0.331 t/h without additional capital expenditures, yielding annual savings of 21.1 million KZT. As an additional outcome, abrasive fly ash carryover through convective heating surfaces is reduced by 134 kg/h, or approximately 1005 tonnes per heating season, significantly lowering the environmental burden. The proposed method can be adapted for other drum boilers and integrated into a real-time automated mode control system, making it suitable for practical industrial application.

Key words: *steam boiler, BKZ-320-140, Ekibastuz coal, high-ash fuel, abrasive wear, optimal control, linear programming, MATLAB.*

Авторлар туралы мәліметтер

Ансар Нұржанұлы Бақытжанов* – «Автоматтандыру және басқару» мамандығы бойынша докторант, «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: bakytzhanovansar4@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/ 0009-0007-8210-9323.

Дана Каримтаевна Сатыбалдина – қауымдастырылған профессор, техника ғылымдарының кандидаты, «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасының профессор м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: satybaldina_dk@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5445-4516.

Айна Жанузаковна Закарина – PhD, «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасының аға оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: zakarina_azh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3875-2883.

Нурбол Бейбитович Шмитов – «Автоматтандыру және басқару» мамандығы бойынша докторант, «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: nurbol-970817@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6402-9633.

Нұрдаулет Мұратбекұлы Тешебаев – «Интеллектуалды басқару жүйелері» мамандығы бойынша докторант, Жасанды интеллект және Big Data кафедрасы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: nurdauletteshebaev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6560-6578.

Сведения об авторах

Ансар Нуржанович Бакытжанов* – докторант, специальность «Автоматизация и управление» кафедры «Системный анализ и управление», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: bakytzhanovansar4@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/ 0009-0007-8210-9323.

Дана Каримтаевна Сатыбалдина – ассоциированный профессор, кандидат технических наук, и.о. профессора кафедры «Системный анализ и управление», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: satybaldina_dk@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5445-4516.

Айна Жанузаковна Закарина – PhD, старший преподаватель кафедры «Системный анализ и управление», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: zakarina_azh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3875-2883.

Нурбол Бейбитович Шмитов – докторант, специальность «Автоматизация и управление» кафедры «Системный анализ и управление», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: nurbol-970817@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6402-9633.

Нұрдаулет Мұратбекұлы Тешебаев – докторант, специальность «Интеллектуальные системы управления» кафедры Искусственного интеллекта и Big Data, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Республика Казахстан; e-mail: nurdaulettеshebaev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6560-6578.

Information about the authors

Ansar Nurzhanovich Bakytzhanov* – PhD student in Automation and Control, Department of Systems Analysis and Control, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: bakytzhanovansar4@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/ 0009-0007-8210-9323.

Dana Karimtaevna Satybaldina – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Acting Professor of the Department of Systems Analysis and Control, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: satybaldina_dk@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5445-4516.

Aina Zhanuzakovna Zakarina – PhD, Senior Lecturer of the Department of Systems Analysis and Control, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: zakarina_azh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3875-2883.

Nurbol Beibitovich Shmitov – PhD student in Automation and Control, Department of Systems Analysis and Control, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: nurbol-970817@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6402-9633.

Nurdaulet Muratbekuly Teshebayev – PhD student in Intelligent Control Systems, Department of Artificial Intelligence and Big Data, Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: nurdaulettеshebaev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6560-6578.

Редакцияға енуі 01.06.2026
Өңдеуден кейін түсуі 07.07.2026
Жариялауға қабылданды 17.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-12

МРТИ: 50.43.19

Б. Копабаева, А. Золотов*, И. Карымсакова, Д. Мясоедов, Р. Назаров
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: azol64@mail.ru

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ ВТОРОГО ПОДЪЕМА НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА И ПРЕДИКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация: *В статье рассматриваются вопросы математического моделирования и оптимизации режимов работы насосных станций второго подъёма в условиях переменного водопотребления городских систем водоснабжения. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения энергоэффективности, снижения потерь воды и обеспечения стабильности гидравлических параметров в условиях неравномерного потребительского спроса. В качестве объекта исследования выбран водозабор «Смычка» города Семей. Разработана динамическая математическая модель системы водоснабжения, включающая насосную станцию второго подъёма, резервуары чистой воды и хлорирования, трубопроводную сеть, модель водопотребления и цифровой двойник объекта. Для повышения точности оценки состояния системы использован фильтр Калмана, а прогнозирование водопотребления реализовано на основе нейронной сети LSTM. Предложена архитектура интеллектуального управления, основанная на консультативном модельно-предиктивном управлении (Advisory MPC), интегрированном с существующей инфраструктурой PLC/SCADA без вмешательства в действующие контуры автоматизации. Эффективность разработанного подхода исследована в трёх эксплуатационных сценариях: номинальном режиме, режиме пикового водопотребления и аварийной перегрузке. Результаты моделирования показали повышение устойчивости системы, снижение энергопотребления на 20-30%, уменьшение числа переключений насосов и улучшение качества поддержания давления. Полученные результаты подтверждают перспективность применения*

©Б. Копабаева, А. Золотов, И. Карымсакова, Д. Мясоедов, Р. Назаров, 2026