

FTAMP 50.47.29

Б.А. Сулейменов | ©



Техн. ғылым. д-ры, профессор

ORCID

<https://orcid.org/0000-0002-5782-1315>



К.И. Сатпаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,



Алматы қ., Қазақстан



b.suleimenov@satbayev.university

<https://doi.org/10.55956/JRJB2168>

ФОСФОРДЫ ТАЗАЛАУ ПРОЦЕСІН ТИІМДІ БАҚЫЛАУ ҮШІН ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ АЛГОРИТМДЕРДІҢ ЖАСАЛУЫ ЖӘНЕ ЗЕРТТЕЛУІ

Аңдатпа. Нарықтық экономика жағдайында түсті және кара металлургияда, химия өнеркәсібінде, мұнай химиясында және т.б. технологиялық процестерді басқарудың оңтайлы жүйелерін енгізудің өткір міндеті тұр. Бұл минералдық ресурстарды ұтымды пайдалануға, жылу және электр энергиясын үнемдеуге, экологиялық зардаптарды азайтуға және өндірістің экономикалық тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Әлемде технологиялық процестердің барлық түрлерін басқарудың оңтайлы жүйелерін белсенді түрде әзірлеу және енгізу өткен ғасырдың 60-80 жылдарында басталып, жалғасын тапты. Дегенмен, осы күнге дейін айтарлықтай автоматтандырылған оңтайлы басқару жүйесі енгізілген жоқ. Бұл қазіргі технологиялық процестерде болып жатқан физикалық және химиялық құбылыстардың шектен тыс күрделілігіне байланысты және нәтижесінде бұл құбылыстардың жеткілікті барабар математикалық сипаттамасын жасау мүмкін болмай тұр.

Соңғы уақытта бүкіл әлемде сарапшылардың білімін, тәжірибесін және ішкі түйсігін пайдалануға мүмкіндік беретін заманауи интеллектуалды технологияларды қолдану үрдісі байқалуда. Сонымен қатар, оңтайлы басқару жүйелерін синтездеу кезінде жасанды интеллект әдістерін қолдану оларды құру процесін айтарлықтай жеңілдетуге, басқару модельдерінің сапасын жақсартуға және олардың тиімділігін арттыруға мүмкіндік берді. Сондықтан әр түрлі технологиялық процестерді, оның ішінде фосфор қосалқы өнеркәсібін басқарудың интеллектуалды үлгілерін (алгоритмдерін) әзірлеу және енгізу өзекті міндет болып табылады.

Жаңажамбыл фосфор зауытының (ЖЖФЗ) өндірістік жағдайында фосфорды күшән мен органикалық заттардан тазарту жаңа күрделі технологиялық процесті басқарудың жаңа интеллектуалды алгоритмдерін құрудың әдістері мен құралдарын қолдануды ұсынамыз.

Тірек сөздер: сары фосфор, толық факторлық эксперимент (ТФЭ) матрицасы, оңтайлы басқару алгоритмдері, фосфорды тазарту, күшән, органикалық заттар, интеллектуалды басқару модельдері, бұлдыр алгоритмдер, нейрондық желілер, бұлдыр нейрондық алгоритмдер.



Сулейменов, Б.А. Фосфорды тазалау процесін тиімді бақылау үшін интеллектуалды алгоритмдердің жасалуы және зерттелуі [Мәтін] / Б.А. Сулейменов // Механика және технологиялар / Ғылыми журнал. – 2024. – №2(84). – Б.389-404. <https://doi.org/10.55956/JRJB2168>

Кіріспе. Қазіргі уақытта минералдық ресурстарды неғұрлым ұтымды пайдалануға, жылу және электр энергиясын үнемдеуге, экологиялық проблемаларды азайтуға, экономикалық қайтарымды арттыруға мүмкіндік беретін металлургия, химия өнеркәсібі, мұнай химиясы және т.б. өндірісте технологиялық процестерді басқарудың оңтайлы жүйелерін жасау міндеті барған сайын өзекті бола түсуде. Әлемде, КСРО-да және Қазақстанда әртүрлі технологиялық процестерді басқарудың оңтайлы жүйелерінің қызу даму кезеңі өткен ғасырдың 60-80 жылдарында болды. Дегенмен, осы уақытқа дейін, мысалы, Қазақстанда айтарлықтай оңтайлы басқару жүйесі енгізілген жоқ [1-3]. Бұл түсті және қара металлургия, химия және Қазақстан экономикасының басқа да салаларындағы технологиялық процестердің шектен тыс күрделілігіне байланысты. Мұндай күрделі процестердің жеткілікті барабар математикалық модельдерін құру талпыныстары, өкінішке орай, нәтижесіз болып қалды. Осының салдарынан модельдеу практикасы біртіндеп тоқтап қалды. Соңғы жылдары бұл бағыттағы жарияланымдар айтарлықтай азайды. Қазіргі интеллектуалды жүйелердің қарқынды дамуының замануи әдістері мен құралдарын жасаудың және құрудың осы әдістердің практикалық қолданылуы бойынша басқару жүйесін құруда жарияланымдардың біршама өсуіне алып келді.

Фосфорды органикалық қоспалардан және күшәннан тазарту процесін басқару үшін интеллектуалды технологияларды құрудың әзірленген әдістері мен құралдарын сынақтан өткізуді ұсынамыз. Сонымен бірге, бұл процестің көрсеткіштерін шамалы жақсартудың өзі айтарлықтай экономикалық және экологиялық зардаптарға әкелетінін ескеру қажет.

ҚазҰТЗУ-дың автоматтандыру және басқару кафедрасында жүргізілген көптеген зерттеулер, сондай-ақ жарияланымдарды талдау интеллектуалды технологияларды технологиялық процестің өзі емес, оңтайлы процестерді басқарудың тікелей моделін жасауда қолдануға болатынын көрсетті. Яғни, қарастырылып отырған интеллектуалды технологиялар (ИТ) дәстүрлі тізбекпен салыстырғанда, басқару алгоритмдерін бірден жасауға мүмкіндік береді: технологиялық модель құрылымын жасау → нысанда эксперименттік зерттеулер жүргізу → модельді анықтау → оңтайландыру мәселесін тұжырымдау → оңтайландыру әдісін таңдау → оңтайлы басқару алгоритмін әзірлеу. Дәстүрлі әдіс басқарудың оңтайлы жүйесін құрудың ұзақ (кейде бірнеше жыл), қымбат, сондай-ақ әрқашан да табысты бола бермейтін жолын қамтиды [1-3].

ИТ қолданысы ұқсас мәселелерді бірден шешуге және тәжірибе көрсеткендей, жеткілікті сәтті мүмкіндік береді. Өйткені, жасанды интеллект әдістері пәндік саланы жақсы білетін адам сарапшыларының білімін, тәжірибесін және түйсігін пайдалануды көздейді. Яғни, бұл жерде «дайын білім» деп аталатын эффект қолданылады. Керісінше, математикалық модельді әзірлеу (жүйенің негізгі құрамдас бөлігі) «жаңа білімді» құру процесі болып табылады, сондықтан теориялық зерттеулер үшін айтарлықтай ұзақ уақытты, сондай-ақ эксперименталды зерттеулерді жүргізуге және моделін анықтауға үлкен материалдық және еңбек шығындарын талап етеді.

Сонымен қатар, тәжірибелі технолог-операторлар ұзақ мерзімді жұмыс барысында әртүрлі бастапқы жағдайларда технологиялық процесті оңтайлы режимдерде жүргізуді үйренді (және олар жиі табысқа жетеді). Мамандардан «дайын білімді» интеллектуалды жүйенің білім қорына беру интеллектуалды жүйелерді құруды айтарлықтай жеңілдетеді.

Қазақстанның «Индустрия 4.0» даму бағдарламасының ережелеріне сәйкес процесті басқару кезінде «адам факторының» әсерін (олар адам ағзасының қасиеттері: шаршау, жеткіліксіз жылдам реакция, жеткіліксіз психологиялық тұрақтылық, монотонды жұмыс кезінде ұйқышылдық, жас операторлардың жеткіліксіз жұмыс тәжірибесі және басқа да себептер) жоюға мүмкіндік беретін технолог-оператордың «цифрлық егізі» әзірленетін болады.

Бұл жобаның мақсаты – ЖЖФЗ-да жоғары сапалы тауарлық өнімдер – төмен мышыяқты фосфорды өндіре отырып, фосфорды органикалық заттар мен күшәннен тазартудың технологиялық процесін оңтайлы басқарудың интеллектуалды алгоритмдерін жасау және өнеркәсіптік сынақтан өткізу.

Негізгі міндеттер:

– сары фосфорды тазарту процестерін оңтайлы басқару үшін интеллектуалды алгоритмдерді синтездеу концепциясын тұжырымдау;

– процестерді оңтайлы басқару алгоритмдерін синтездеу үшін толық факторлық эксперимент (ТФЭ) матрицаларын қалыптастыру: сары фосфор тұнбасы, фосфор шламын құрғату, фосфор шламын органикалық қоспалардан тазарту және А класындағы тауарлы фосфорды алу үшін фосфорды күшәннен тазарту;

– бұлдыр алгоритмдер, нейрондық желілер, бұлдыр нейрондық алгоритмдер әдістерін қолдана отырып, осы төрт процесті оңтайлы басқару үшін интеллектуалды модельдерді (алгоритмдерді) синтездеу;

– барабарлық, бірімәнділік, тұрақтылық және сезгіштік үшін синтезделген интеллектуалды басқару модельдері бойынша зерттеулер жүргізу;

Зерттеу нысаны – фосфор қышқылын күшән мен органикалық заттардан тазарту технологиясы, ал зерттеу пәні – осы технологиялық процесті басқарудың интеллектуалды алгоритмдері.

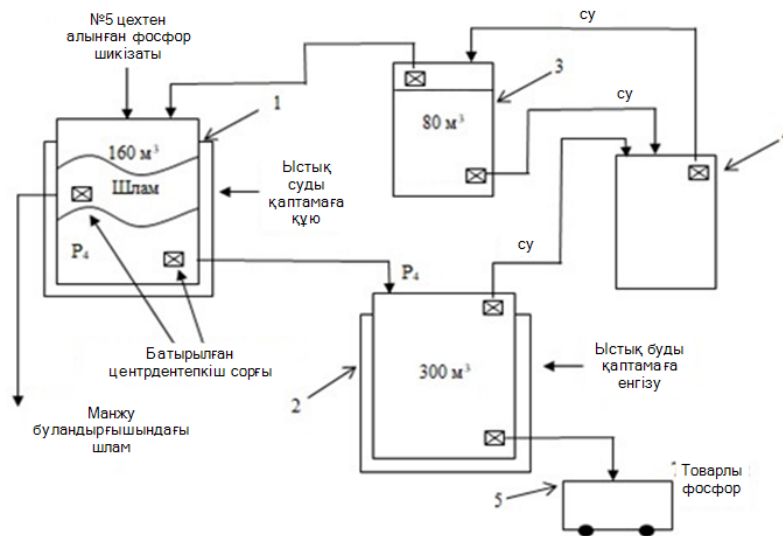
Зерттеу шарттары мен әдістері. 1. Тұндыру процесін оптимальды басқару мәселесінің қойылымы. Сары фосфор шикізаты №5 пеш цехынан фосфорды тұндыру бөліміне қыздырылған құбырлар арқылы он тұндырғыға түседі (1-сурет, 1-позиция). «Шлам: Р₄» қатынасы = 60%-40%.

Тұндырғыштар диаметрі 7,4 м, биіктігі 4 м, көлемі 160 м³ тот баспайтын болаттан жасалған резервуарлар болып табылады. Фосфорды 70°C-80°C температурада балқыған күйде ұстап тұру үшін, тұндырғыштың қаптамасына 90°C-тан аспайтын ыстық су беріледі, процесті жақсарту үшін тұндырғыштар араластырғыштармен жабдықталған. Тұндырудың ұзақтығы - кем дегенде 2 сағат. Әрбір тұндырғыш екі суасты сорғымен жабдықталған, олардың біреуі фосфорды, екіншісі фосфор шламын айдауға арналған. Фосфор шламы одан сары фосфордың қалдығын алу және фосфорды күшән мен органикалық қоспалардан тазарту үшін одан әрі өңдеу үшін жойылады.

Фосфордың өздігінен жануын болдырмау үшін шұңқыр су қабатының астында орналасады және азотпен қамтамасыз етіледі. Тұндырғыштардан фосфор немесе тұнба сорылатындықтан, олар тұндырғыштардағы сұйықтықтың жоғарғы деңгейі тұрақты болуы үшін қышқыл су ыдысынан сумен толтырылады (3-позиция). Сары фосфор 12 қоймаға (2-позиция) 70°C-80°C температурада түседі.

Тұндыру бөлімінің тәжірибелі операторлары арасында сауалнама жүргізу нәтижесінде, тұндыру процесі фосфор шикізаты температурасына, "шихта: фосфор" қатынасына және тұндырғыштың рубашкасына берілетін ыстық су температурасына байланысты екені анықталды. Тұндыру сапасын анықтайтын критерий – тауарлық фосфорға (Р₄) түсетін фосфор тазалығы:

резервуар-қоймаларға (2-позиция) кем мөлшерде шлам келіп түссе, соншалықты тауарлық фосфордың (P_4) сапасы жоғары болады.



1 – 10 бірлік көлемінде тұндырғыштар; 2 – 12 бірлік көлемінде сары фосфор сақтауға арналған резервуарлар; 3 – 2 бірлік көлемінде қышқылды суға арналған цистерналар; 4 – құрамында фосфоры бар қалдықтарға арналған цистерналар; 5 – тауарлы фосфорды тұтынушыларға жөнелтуге арналған теміржол цистернасы.

Сурет 1. Фосфор тұнбалары мен тазарту бөлімшесінің аппараттарының схемасы

Тауарлы фосфордың сапасын тұнбаның ұзақтығын өзгерту арқылы бақылауға болады – тұндыру ұзақтығы неғұрлым ұзақ болса, тауарлық фосфордың сапасы да соғұрлым таза болады, яғни тауарлық фосфордағы шлам мөлшері ең аз болады. Сонымен қатар, тұндыру ұзақтығынан бүкіл бөлімшенің өнімділігі де тәуелді: тұндыру ұзақтығы неғұрлым көп болса, бөлімшенің өнімділігі соғұрлым төмен болады. Сондықтан тұндыру процесінің тиімділігі операторлардың шеберлігіне байланысты – берілген P_4 тауарлық фосфор сапасына қол жеткізу қажет және сонымен бірге бүкіл бөлімшенің өнімділігін төмендетпеу керек. Осылайша, шикізат фосфор шламын өңдеу процесін оңтайлы басқару міндеті мынадай: «Төменгі тұндыру бөлімінің өнімділігін арттыру кезінде тауарлық фосфордың қажетті сапасына қол жеткізу».

Жұмыстардың талдауы [5-19] тұндыру процесінің интеллектуалды модельдерін синтездеу үшін осы авторлардың тәжірибесін пайдалануға мүмкіндік берді, бұл ретте тұндыру ұзақтығын басқару "жақсы" тұндырғыштарда процесті уақтылы аяқтауға және "нашар" тұндырғыштарда тұндыруды ұзартуға келіп тіреледі. Сары фосфор тұнбасы процесінің интеллектуалды моделі «жақсы» және «жаман» тұндырғыштарды анықтауға көмектеседі, оның міндеті оператордың әрекетіне байланысты емес әртүрлі факторларды ескере отырып, тұнбаның ұзақтығын болжау болып табылады. Модельдің болжамды шешімдеріне ие бола отырып, оператор алдын ала «жақсы» және «жаман» тұндырғыштарды анықтай алады, осылайша бүкіл шлам бөлімін (10 тұндырғыш) оңтайлы басқара алады: «Тауарлық фосфордың

берілген сапасына қол жеткізу кезінде бүкіл тұндыру бөлімшенің өнімділігін арттыру».

2. ТФЭ матрицасын құру және сары фосфордың тұндыру процесінің моделін синтездеу. Модельдерді машиналық оқытудың бастапқы деректері [1,2,3,8] әдістемемізге сәйкес қалыптастырылды, ол үшін тұндыру процесіндегі айнымалылар үшін келесі белгілерді қабылдаймыз: X1 – фосфор температурасы (70°-80°С); X2 – «шлам: P₄» қатынасы (60%-40%); X3 – тұндырғыш қаптамасындағы ыстық судың температурасы (70°-95°С); Y – тұндыру ұзақтығы. Бұл ретте операторда X1 және X2 модельдің кіріс айнымалыларын, яғни №5 цехтің жұмысына байланысты айнымалыларды, яғни су температурасы жылу цехының жұмысына тәуелді болғандықтан, өзгерту мүмкіндігі жоқ екендігін ескеру қажет. Оператор тек осы айнымалыларды басқара алады.

Тұндыру бөлімінің операторлары арасында сауалнама нәтижелері осы айнымалы мәндердің орташа бағалары тұндыру ұзақтығына қалай әсер ететінін анықтады (1-кесте). 1-кестеде интеллектуалды модельдердің синтезіне арналған толық факторлық эксперименттің (ТФЭ) матрицасы бар. 1-кестеде барлық айнымалылар 0,0 (ең төменгі мән) мен 1,0 (ең жоғарғы мән) аралығындағы нормаланған (өлшемсіз) түрде берілген.

Кесте 1

Шикізат фосфорды тұндыру процесі үшін ТФЭ матрицасы

Тәжірибе нөмірі	Фосфор температурасы, X ₁	«Шлам: P ₄ » қатынасы, X ₂	Су температурасы, X ₃	Тұндыру уақыты, Y
1	2	3	4	5
1	0,0	0,0	0,0	0,98
2	0,5	0,0	0,0	0,91
3	1,0	0,0	0,0	0,82
4	0,0	0,5	0,0	0,21
5	0,5	0,5	0,0	0,124
6	1,0	0,5	0,0	0,07
7	0,0	1,0	0,0	0,065
8	0,5	1,0	0,0	0,06
9	1,0	1,0	0,0	0,058
10	0,0	0,0	0,5	0,99
11	0,5	0,0	0,5	0,92
12	1,0	0,0	0,5	0,82
13	0,0	0,5	0,5	0,21
14	0,5	0,5	0,5	0,128
15	1,0	0,5	0,5	0,072
16	0,05	1,0	0,5	0,066
17	0,5	1,0	0,5	0,062
18	1,0	1,0	0,5	0,06
19	0,0	0,0	1,0	0,97
20	0,5	0,0	1,0	0,88
21	1,0	0,0	1,0	0,78
22	0,0	0,5	1,0	0,18
23	0,5	0,5	1,0	0,12
24	1,0	0,5	1,0	0,065
25	0,0	1,0	1,0	0,062
26	0,5	1,0	1,0	0,058
27	1,0	1,0	1,0	0,056

1-кестедегі ТФЭ матрицасы интеллектуалды модельдердің үш түрін оқытуға қызмет етеді: бұлдыр модель, нейрондық желілер, бұлдыр нейрондық модель.

Бұлдыр модель. Matlab [4] жүйесінің графикалық құралдарын пайдалана отырып, бұлдыр моделді әзірлеу үшін үш кіріс және бір шығыс айнымалылар үшін мүшелік функцияларын анықтаумен және бұлдыр өндіріс ережелерін қалыптастыру арқылы жүзеге асырылды, яғни 1-кестедегі әрбір эксперименттің өз өнімділік ережесі бар, мысалы:

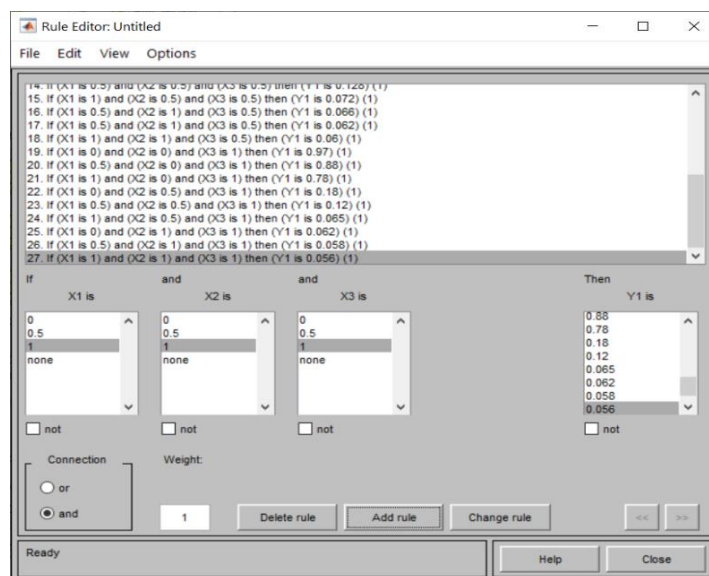
1-ереже: «егер x_1 тең 0» және « x_2 тең 0,5» және « x_3 тең 0» болса, онда « y тең 0,98»;

2-ереже: «егер x_1 тең 0,5» және « x_2 тең 0,0» және « x_3 тең 0» болса, онда « y тең 0,91»;

3-ереже: «егер x_1 тең 1» және « x_2 тең 0,0» және « x_3 тең 0,0» болса, онда « y тең 0,82»;

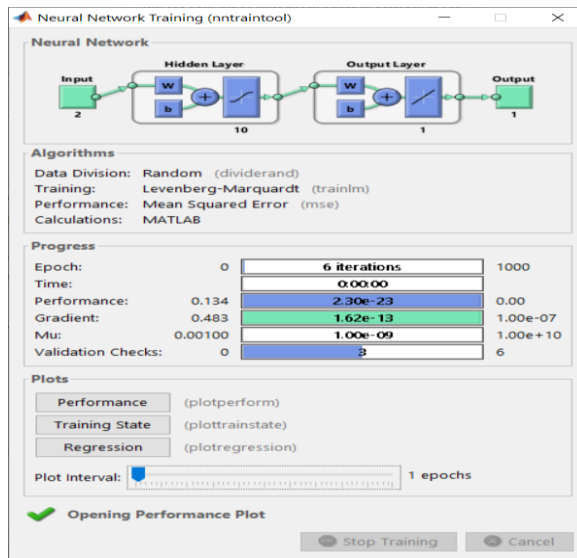
4-ереже: «егер x_1 тең 1,0» және « x_2 тең 0,0» және « x_3 тең 0,0» болса, онда « y тең 0,21».

Өндіріс ережелері 1-кестедегі барлық 27 эксперимент үшін бірдей құрастырылған (2-сурет). Matlab таңдалған бұлдыр қорытындылау алгоритмімен (Мамдани алгоритмі) барлық қажетті процедураларды орындағаннан кейін, сары фосфорды тұндыру процесінің бұлдыр моделі синтезделді (2-сурет).



Сурет 2. Сары фосфордың тұндыру процесінің бұлдыр моделі

Нейрондық желі моделі. Нейрондық желі MatLAB ортасының командалық терезесінен nntool модулінің көмегімен құрастырылды. Әрі қарай кіріс деректерін және олардың сәйкес нәтижелерін енгізіп, нейрондық желі түрін таңдап (3-сурет) және оны оқыту жүргізілді.

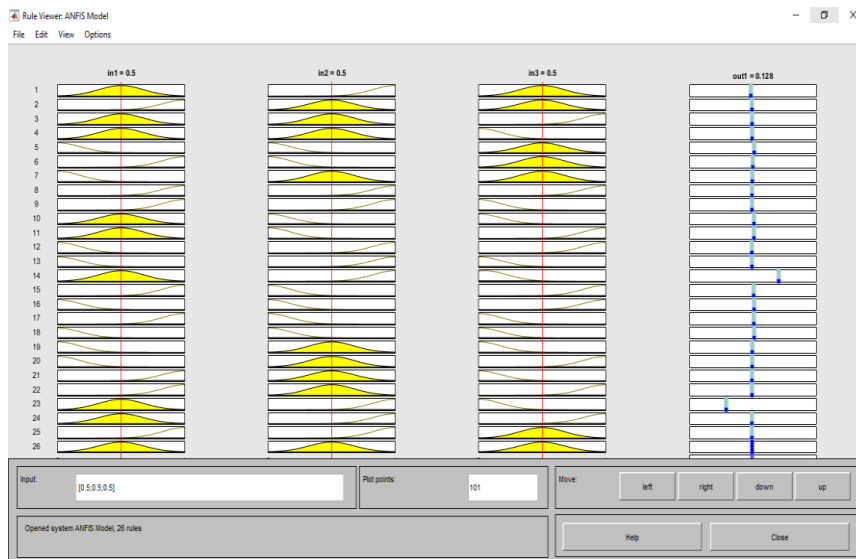


Сурет 3. Нейрондық желіні оқытуды жүргізу

Нейро-бұлыңғыр модель. MATLAB жүйесінде нейро-бұлыңғыр қорытынды моделін құруға, оқытуға, құрылымын визуалдауға, параметрлерін өзгертуге және реттеуге, сондай-ақ реттелген желіні бұлдыр қорытынды нәтижелерін алу үшін пайдалануға мүмкіндік беретін ANFIS редакторы бар.

Біз Gridpartition торды бөлу әдісін таңдадық, оған сәйкес анық емес терминдердің мүшелік функциялары деректер өзгерістерінің ауқымында біркелкі таратылады. Білім қоры 1-кестедегі барлық мүмкін ережелер нұсқаларын қамтиды. Ережелердің тұжырымдарындағы коэффициенттер нөлге тең деп алынды.

Модельді сынақ үлгісінде сынау үшін бұлдыр жүйе тесті блогында (Test FIS) сынақ деректері (Testingdata) таңдалды. Сынақ нәтижелері ANFIS редакторының негізгі терезесінде көрсетіледі. MatLab нейро-бұлыңғыр желісі үшін 27 ереже құрды (4-сурет).



Сурет 4. Нейро-бұлыңғыр модель

Үлгілердің барлық үш түрінің сәйкестігі бойынша салыстырмалы зерттеулердің нәтижелері 2-кестеде көрсетілген.

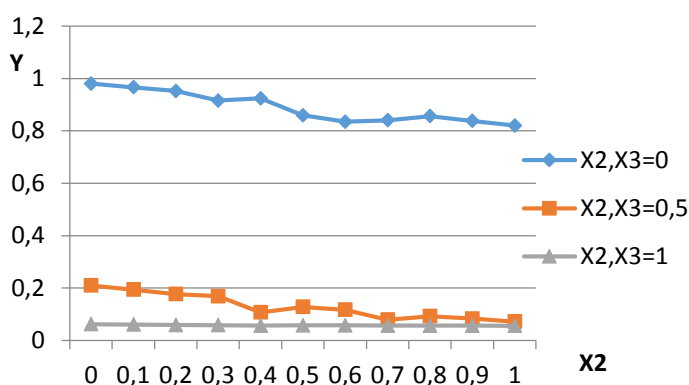
Кесте 2

Интеллектуалды модельдердің дәлдігін салыстырмалы талдау

№	Дұрыс жауап	Бұлдыр логика	Нейрондық желі	Бұлдыр нейрондық желі
1	0,98	0,125	0,92878	0,9800
2	0,91	0,5	0,64418	0,9100
3	0,82	0,837	0,76134	0,8200
4	0,21	0,67	0,10231	0,2100
5	0,124	0,09	0,16383	0,1240
6	0,07	0,5	0,32048	0,0700
7	0,065	0,13	0,057247	0,0650
8	0,06	0,79	0,060076	0,4897
9	0,058	0,211	0,077015	0,0580
10	0,99	0,211	0,82057	0,9900
11	0,92	0,5	0,059733	0,4783
12	0,82	0,79	0,98687	0,8200
13	0,21	0,79	0,2648	0,2100
14	0,128	0,168	0,10334	0,1280
15	0,072	0,5	0,11462	0,0720
16	0,066	0,5	0,056963	0,0700
17	0,062	0,5	0,056963	0,0700
18	0,06	0,5	0,072156	0,0600
19	0,97	0,13	0,98728	0,9700
20	0,88	0,13	0,98837	0,8800
21	0,78	0,5	0,98956	0,7800
22	0,18	0,79	0,5749	0,1800
23	0,12	0,79	0,862	0,1200
24	0,065	0,5	0,774	0,0650
25	0,062	0,79	0,11218	0,0620
26	0,058	0,5	0,059589	0,0579
27	0,056	0,79	0,059069	0,0560
Қателік		18,05%	16,22%	3,27%

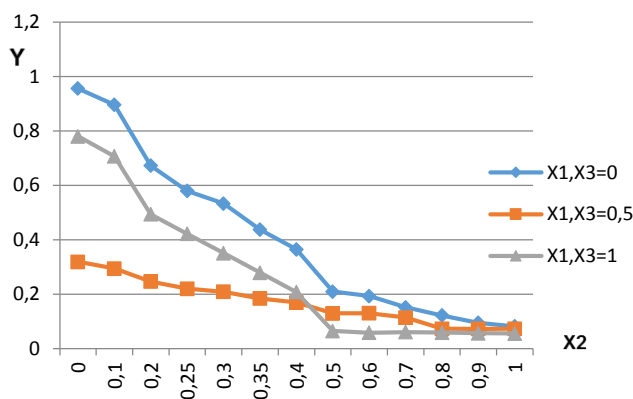
2-кестенің талдауы ең барабарлы бұлдыр нейрондық модель екенін көрсетті, оның абсолютті қателігі 3,2% құрайды. Осыған байланысты төменде сары фосфордың тұндыру процесін модельдеу нәтижелерін тек осы модель арқылы қарастырамыз.

3. Бұлдыр нейрондық желінің көмегімен тұндыру процесін модельдеу. 5-суретте шикізат температурасы X1 (№5 цехтан алынған сары фосфор) функциясы ретінде тұнба жинағыштың өнімділігіне (тұндыру ұзақтығы - Y) байланысты нейро-бұлыңғыр модельдеу нәтижелері көрсетілген. Суретте көрсетілгендей, X2 («шлам:Р₄» қатынасы) және X3 (су температурасы) мәндері ең аз болғанда, X1 сары фосфордың температурасы диапазонының барлық ауқымында өнімділік жеткілікті төмен, сонымен бірге тұндыру уақыты 1,0-ден 0,8-ге дейін төмендейді. Алайда, X2 және X3 орташа және жоғары мәндерінде тұндыру ұзақтығы күрт төмендейді (яғни, тұнба жинағыштың өнімділігі артады), бірақ ол тұнба жинағышқа кіретін сары фосфор температурасының (X1) артуына да әсерлі түрде өзгермейді.



Сурет 5. Тұндыру ұзақтығының сары фосфор температурасына тәуелділігі

Бұл сандардағы қисықтардың өзгеру сипатынан көрініп тұрғандай, тұндыру ұзақтығының X2 өзгерістеріне тәуелділігі X3-ке қарағанда әлдеқайда жоғары. Сонымен бірге, 2-5-суреттегі графиктерден X2 және X3 орташа және үлкен мәндерінде тұндырғыштың өнімділігі күрт өсетіні анық көрінеді. Дегенмен, 6-суреттегі графиктер тұндыру уақыты негізінен «шлам:Р4» қатынасына байланысты екенін көрсетеді, ал 7-суреттегі қисық сызықтар өнімділіктің тұндырғыш қаптамасындағы судың температурасына іс жүзінде тәуелсіз екенін көрсетеді.

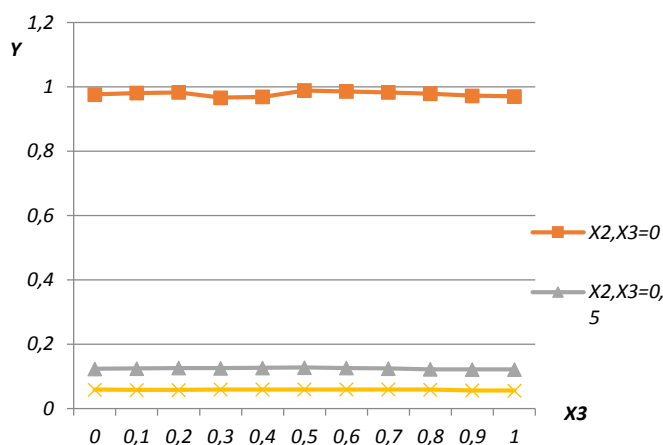


Сурет 6. Тұндыру уақытының «шлам: Р4» қатынасының өзгеруіне тәуелділігін модельдеу нәтижелері

Осылайша, модельдеу нәтижелері тұндырғыштың өнімділігі көп дәрежеде «шлам: Р4» қатынасына, аз дәрежеде фосфор температурасына тәуелді екенін және су температурасының өзгеруіне іс жүзінде тәуелсіз екенін көрсетті (7-суретті қараңыз).

Бірақ бұл тұндыру процесін бақылау кезінде тұндырғыш қаптамасындағы судың температурасын есепке алудың қажеті жоқ дегенді білдірмейді, өйткені сары фосфордың агрегаттық күйі оған байланысты: 70°C-тан төмен температурада фосфор қатты күйге өтеді және тұну процесі тоқтайды, өйткені ол шламмен бірге түбіне қалады, ал 95°C-тан жоғары болғанда сары фосфор булануға бастайды - бұл оның тікелей жоғалуы. Сонымен қатар, температураны бақылау тұнба процесін қауіпсіз

пайдаланудың маңызды факторы болып табылады, өйткені фосфор жарылғыш болып табылады.



Сурет 7. Тұндырғыш қаптамасындағы судың температурасына тұндыру уақытының тәуелділігі

5, 6 және 7-суреттерде берілген нейро-анық емес модельді қолдану арқылы модельдеу нәтижелері сары фосфордың тұндыру процесінің физикалық заңдарымен жақсы сәйкес келеді. Сары фосфорды тұндыру процесі түсті металлургия мен химия өнеркәсібінде қолданылатын сұйық ортадағы шламды тұндыру процестерінен айтарлықтай ерекшеленетінін атап өткен жөн. Шындығында, тұнбаның (зиянды компонент) белгілі процестерінен айырмашылығы, біздің жағдайда тұнба емес, сары фосфордың өзі шөгеді. Бұл жағдайда тұнба тұндырғыштың бетіне қалқып шығады.

Бұл факт фосфорды тазарту процесін шламды тұндырудың белгілі процестерінен түбегейлі ажыратады. Тұнбаны тұндырудың жеткілікті дамыған теориясы сары фосфордың тұндыру процесін сипаттау үшін жұмыс істемейді. Бұл теорияға сәйкес, тұнба концентрациясы неғұрлым жоғары болса, қоюлатқыштың өнімділігі соғұрлым төмен болады (немесе тұнбаның тұндыру уақыты ұзағырақ). Бұл әсер тұнба бөлшектерінің шектелген шөгуімен түсіндіріледі – олардың концентрациясы неғұрлым жоғары болса, тұнба бөлшектерінің шектеулері соғұрлым жоғары болады, өйткені бөлшектер бір-біріне көбірек әсер ете бастайды, олардың шөгу жылдамдығын бәсеңдетеді. Фосфорлы жауын-шашын жағдайында бәрі керісінше болады: лайдың концентрациясы неғұрлым жоғары болса, тұнбаның ұзақтығы соғұрлым қысқа болады (немесе тұндырғыштың өнімділігі соғұрлым жоғары), бұл 5-суреттен анық көрінеді және мыналармен расталады: 6 және 7-суреттердегі графиктер. Бұл әсер біздің жағдайда шөгіндіде шөгіндінің жоғарғы жағында жиналатын тұнба емес, фосфордың тұндырылуымен түсіндіріледі. Фосфор бөлшектерінің концентрациясы неғұрлым төмен болса, олардың тұндырғыш түбіне шөгу процесі соғұрлым тезірек жүреді екен. Ал егер сары фосфордың концентрациясы жоғары болса, онда оның бөлшектерін топтастыру әсері олардың шөгу жылдамдығын төмендетеді.

Осылайша, 5, 6 және 7-суреттерде көрсетілген графиктер сары фосфордың тұндыру процесінің физикалық заңдарымен жақсы сәйкес келеді және оның математикалық модельдері болып табылады.

4. Сары фосфорды тұндыру процесін оңтайлы басқарудың интеллектуалды алгоритмі. Жоғарыда атап өтілгендей, тауарлы фосфордың сапасын шламның ұзақтығын өзгерту арқылы бақылауға болады – ол неғұрлым жоғары болса, тауарлық фосфордың сапасы соғұрлым таза болады, яғни тауарлы фосфордағы шламның мөлшері минималды болады.

Дегенмен, бүкіл бөлімнің өнімділігі тұндырудың ұзақтығына да байланысты – тұндыру уақыты неғұрлым ұзақ болса, бөлімнің өнімділігі соғұрлым төмен болады.

Сондықтан шламды өндеудің тиімділігі операторлардың шеберлігіне байланысты - P₄ тауарлық фосфордың көрсетілген сапасына қол жеткізу керек және сонымен бірге бүкіл бөлімнің өнімділігін төмендетпеу керек.

Осылайша, шикі фосфор шламын өндеу процесін *оңтайлы басқару міндеті* келесідей: «Төменгі шламды бөлудің өнімділігін арттыру кезінде тауарлы фосфордың қажетті сапасына қол жеткізу».

Тұндыру процесін модельдеудің синтезделген нейро-бұлыңғыр моделі және оның зерттеу нәтижелері (5, 6 және 7-суреттер) он тұндырғыштың әрқайсысындағы X1, X2 және X3 өзгеруіне байланысты сары фосфорды (Y) құю ұзақтығын нақты уақыт режимінде болжауға мүмкіндік береді. Жоғарыда айтылғандарды ескере отырып, сары фосфорды тұндыру процесін оңтайлы басқару стратегиясы мынадай болады:

Операторға он тұндырғыштың әрқайсысындағы сары фосфорды тұндыру ұзақтығының болжамы туралы ақпарат бар, сол арқылы сары фосфор мен шламды сорып алатын суасты сорғыларды қосу арқылы басқара алады. Бұл жағдайда ең қысқа тұндыру ұзақтығы бар тұндырғыштан фосфор мен шламды максималды ұзақтықтағы тұндырғыштан алынған көлемнен көп алуға мүмкіндік береді.

Осылайша, интеллектуалды модель операторға кез келген уақытта 10 тұндырғыштың қайсысы «нашар» (ең көп тұндыру уақыты) және қай тұндырғыш «жақсы» (ең аз тұндыру уақыты) туралы ақпаратты алуға мүмкіндік береді. Бұл ақпаратты өндеу арқылы оператор «жақсы» тұндырғыштардан көбірек фосфор мен шламды, ал «жаман» тұндырғыштардан азырақ сорып алады.

Бұл жерде интеллектуалды басқару жүйесі операторға «жақсы» және «нашар» тұндырғыштар туралы ақпаратты алдын ала беруге мүмкіндік беретінін атап өткен жөн, осылайша фосфор мен шламды айдау үшін суасты сорғыларының қисынсыз қосылуын және өшірілуін болжауға болады.

Сонымен қатар, оператор тұндыру процесін көзбен бақылай алмайды, өйткені тұндырғыш жабық объект болып табылады, яғни объектінің бақылау мүмкіндігі нөлге тең. Бұл жағдайларда оператор сары фосфорды сақтау резервуарына (1-суреттегі 2-позиция) түскен шламды тым кеш байқап, бөлімнің жұмысында ақау тудыруы мүмкін.

Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау. Осылайша, оператор «жақсы» тұндырғыштарды жылдам босатуға (1-суреттегі 1-позиция) және «нашар» тұндырғыштарды баяу босатуға мүмкіндік алады. Сонымен қатар, оператор алынған үлгілердегі сары фосфордың «тазалығын» бақылау үшін тұндырғыштарды тексеру қажеттігі аз болады, бұл оның жұмысын жеңілдетеді және уақытының көп бөлігін тұндырғыштардан фосфор мен шламды айдау жылдамдығын реттеу процесіне көбірек уақыт бөлуге мүмкіндік береді.

Басқаша айтқанда, бұл жағдайда тұндыру процесін оңтайлы басқарудың негізгі мақсаты шешіледі: «Бүкіл тұндыру бөлімінің өнімділігін максималдандыра отырып, тауарлы фосфордың қажетті сапасын алу».

Қауіпсіздік мақсатында зауыт басшылығы ашық цикл режимінде, яғни, операторға кеңес беру режимінде, интеллектуалды басқару жүйесін өнеркәсіптік сынақтан өткізу туралы шешім қабылдады. Бұл жағдайда өндірістік сынақтар екі кезеңде жүзеге асырылды:

– тұндырма бөлімін басқару процесінде компьютердің араласуынсыз екі апта бойы цех жабдықтарының жұмыс көрсеткіштерін бақылау өлшемдерін;

– нақты уақыт режимінде компьютерлік ұсыныстарды жүзеге асыратын операторлармен екі апта бойы интеллектуалды басқару алгоритмдерін тестілеу.

Салыстырмалы талдау ұсынылып отырған бақылау алгоритмдерінің оң бағасын көрсетті: дайын өнімнің үлестік шығымдылығы 5%-ға артты, ал тауарлы сары фосфордың сапасы 3%-ға жақсарды.

Қорытынды. Жүргізілген жұмыстардың нәтижесінде келесі нәтижелер алынды:

– тұндырғыштардағы тұнба мен фосфордың әрекетін сипаттайтын интеллектуалды модельдер синтезделді және үш технологияны қолдану арқылы зерттелді: бұлдыр және нейро-бұлыңғыр алгоритмдер және нейрондық желілер. Бұл жағдайда үш кіріс және бір шығыс айнымалысы үшін ТФЭ матрицалары пайдаланылды: X_1 – фосфор температурасы (70°C - 80°C); X_2 – «шлам: P_4 » қатынасы (60%-40%); X_3 – тұндырғыш қаптамасына құйылатын ыстық судың температурасы (70°C - 95°C); Y – тұндыру ұзақтығы;

– болжау дәлдігі үшін барлық синтезделген модельдерге зерттеулер жүргізілді, ал нейро-бұлыңғыр модельдер адекваттылықтың жоғары дәрежесін және сары фосфорды тұндыру және тазарту кезінде пайда болатын физика-химиялық заңдылықтарға қайшы келмейтінін көрсетті;

– интеллектуалды алгоритмдердің өнеркәсіптік сынақтары оң нәтиже көрсетті: дайын өнімнің үлестік шығымдылығы 5%-ға артты, ал тауарлы сары фосфордың сапасы 3%-ға жақсарды.

Әдебиеттер тізімі

1. Авторское свидетельство №985. Метод синтеза оптимальных систем управления технологическими процессами [Текст] / Сулейменов Б.А., Сугурова Л.А., Сулейменов А.Б. опубл. от 28 мая 2015 г.
2. Авторское свидетельство № 0665. Метод синтеза системы оперативной диагностики состояния турбоагрегатов тепловых электростанций (произведение науки) [Текст] / Сулейменов Б.А., Сулейменов А.Б. опубл. от 12 апреля 2016 года.
3. Авторское свидетельство № 986. Методика создания автоматизированной системы оперативной диагностики состояния технологического оборудования (произведение науки) [Текст] / Сулейменов Б.А., Сугурова Л.А., Сулейменов А.Б. опубл. от 28 мая 2015 года.
4. Леоненков, А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzTECH [Текст] / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
5. Abdel-Ghafar H.M., Abdel-Aal E.A., Ibrahim M.A.M., El-Shall H., Ismail A.K. Purification of high iron wet-process phosphoric acid via oxalate precipitation method // Hydrometallurgy, 2019. Vol. 184, No 7. P.236.
6. Aguel S., Meddeb Z., Jeday M.R. Parametric study and modeling of cross-flow heat exchanger fouling in phosphoric acid concentration plant using artificial neural network // Journal of Process Control, 2019. Vol. 84. P.133-145.

7. [?] Data Democracy: At the Nexus of Artificial Intelligence, Software Development and Knowledge Engineering Edited by Feras A. Batarseh // Academic Press. – 2020. Vol.2, No 1. P.266.
8. Khamparia A., Pandey B., Pandey D. K., Gupta D., Khanna A., Hugo V. Comparison of RSM, ANN and fuzzy logic for extraction of oleonolic acid from ocimum sanctum // Computers in Industry, 2020. Vol. 117. P.24-26.
9. Offermans T., Szymańska E., Buydens L.M.C., Jansen J.J. Synchronizing process variables in time for industrial process monitoring and control // Computers & Chemical Engineering, 2020. Vol. 140. P.25-28.
10. Rafiei M., Ricardez-Sandoval L.A. Integration of design and control for industrial-scale applications under uncertainty: a trust region approach // Computers & Chemical Engineering, 2020. Vol. 141. P.25-27.
11. Silhavy F., Radek T. Artificial Intelligence and Algorithms in Intelligent Systems // Editors: Proceedings of 7th Computer Science On-line Conference, 2018. Vol. 2. P.118-121.
12. Silhavy F., Radek T. Cybernetics and Automation Control Theory Methods in Intelligent Algorithms // Proceedings of 8th Computer Science On-line Conference, 2019. Vol. 3, No. 17. P.19-21.
13. Suleimenov B. A., Sugurova L. A., Suleimenov A. B. Intelligent systems of optimal control and operational diagnostics (methods of synthesis and application) // Shikula: Almaty, 2016. – P.207.
14. Yang Li, Jianhua Zhang, Wu Qiong. Adaptive Sliding Mode Neural Network Control for Nonlinear Systems. Emerging Methodologies and Applications in Modelling // Academic Press, 2018. Vol.1. P.186.
15. Chang D, Liu J, Mao N, Ge S. Measurement and analysis of virgin-rock temperature in Huanren metal mine // In: Proceedings of the Third International Symposium on Mine Safety Science and Engineering. – Montreal, QC, Canada, 2016. – P. 204.
16. He G., Dang Y., Zhou L., Dai Y., Que Y., Ji X. Architecture model proposal of innovative intelligent manufacturing in the chemical industry based on multi-scale integration and key technologies // Computers & Chemical Engineering, 2020. Vol. 141. P.45-48.
17. Mark K., Robert O. Software Engineering for Embedded Systems. // Newnes, 2019. Vol.12. P.154
18. Paulino N.M.G., Foo M., Kim J., Bates D.G. On the stability of nucleic acid feedback control systems // Automatica, 2020. Vol. 119. P.67-68.
19. Trabelsi W., Tlili A. Phosphoric acid purification through different raw and activated clay materials (Southern Tunisia) // Journal of African Earth Sciences, 2017. Vol. 129. P.647-658.

Материал редакцияға 20.06.2024 түсті.

Б.А. Сулейменов

*Казахский национальный исследовательский технический университет имени
Сатпаева, г. Алматы, Казахстан*

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СМЕСЬ НА ОСНОВЕ АЛКИЛЗАМЕЩЕННЫХ ФЕНОЛОВ

Аннотация. В условиях рыночной экономики существует острая необходимость внедрения оптимальных систем управления технологическими процессами в таких отраслях, как цветная и черная металлургия, химическая промышленность, нефтехимия. Эти системы могут помочь более эффективно использовать минеральные ресурсы, экономить энергию, снижать воздействие на окружающую среду и повышать эффективность производства. Активная разработка и внедрение таких оптимальных систем управления началась в 1960-1980-х годах, однако

значимые автоматизированные системы пока не получили широкого распространения. Это связано с чрезвычайной сложностью физических и химических явлений в современных промышленных процессах, что затрудняет создание адекватных математических моделей.

В последнее время наметилась тенденция к использованию современных интеллектуальных технологий, способных использовать знания, опыт и интуицию экспертов. Использование методов искусственного интеллекта при проектировании оптимальных систем управления существенно упростило их разработку, улучшило модели управления и повысило эффективность. Поэтому актуальной задачей является разработка и внедрение интеллектуальных моделей (алгоритмов) управления различными технологическими процессами, в том числе в фосфорной промышленности.

В тексте предлагается использовать новые интеллектуальные алгоритмы для управления сложным технологическим процессом - очисткой фосфора от мышьяка и органики на Новоджамбылском фосфорном заводе (НДФЗ).

Ключевые слова: желтый фосфор, матрица полного факторного эксперимента (FFE), алгоритмы оптимального управления, очистка фосфора, мышьяк, органика, модели интеллектуального управления, нечеткие алгоритмы, нейронные сети, нейро-нечеткие алгоритмы.

B.A. Suleimenov

Kazakh National Research Technical University named after Satpaev, Almaty, Kazakhstan

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF INTELLIGENT ALGORITHMS FOR OPTIMAL CONTROL OF THE PHOSPHORUS PURIFICATION PROCESS

Abstract. In a market economy, there is a critical need to introduce optimal control systems for technological processes in industries like non-ferrous and ferrous metallurgy, the chemical industry, and petrochemicals. These systems can help use mineral resources more efficiently, save energy, reduce environmental impact, and increase production efficiency. The active development and implementation of such optimal control systems began in the 1960s-1980s, but significant automated systems have not yet been widely adopted. This is due to the extreme complexity of the physical and chemical phenomena in modern industrial processes, which makes it difficult to create adequate mathematical models.

Recently, there has been a trend toward using modern intelligent technologies that can leverage the knowledge, experience, and intuition of experts. The use of artificial intelligence methods in designing optimal control systems has significantly simplified their development, improved control models, and increased efficiency. Therefore, the urgent task is to develop and implement intelligent control models (algorithms) for various technological processes, including those in the phosphorus industry.

The text proposes using new intelligent algorithms to control a complex technological process - the purification of phosphorus from arsenic and organics at the Novodzhambyl Phosphorus Plant (NDPP).

Keywords: yellow phosphorus, matrix of full factorial experiment (FFE), optimal control algorithms, phosphorus purification, arsenic, organics, intelligent control models, fuzzy algorithms, neural networks, neuro-fuzzy algorithms.

References

1. Suleymenov B.A., Sugurova L.A., Suleymenov A.B. Avtorskoye svidetelstvo No. 985. Metod sinteza optimalnykh system upravleniya tekhnologicheskimi protsessami

- [Author's certificate No. 985. Method of synthesis of optimal control system for technological processes]. Publ. dated May 28, 2015, [in Russian].
2. Suleymenov B.A., Suleymenov A.B. Avtorskoye svidetelstvo No. 0665. Metod sinteza sistemy operativnoy diagnostiki sostoyaniya turboagregatov teplovykh elektrostanciy (proizvedenie nauki) [Author's certificate No. 0665. Method of synthesis of a system for operational diagnostics of the state of turbine units of thermal power plants (work of science)]. Publ. dated April 12, 2016, [in Russian].
 3. Suleymenov B.A., Sugurova L.A., Suleymenov A.B. Avtorskoye svidetelstvo No. 986. Metodika sozdaniya avtomatizirovannoy sistemy operativnoy diagnostiki sostoyaniya tekhnologicheskogo oborudovaniya (proizvedenie nauki) [Author's certificate No. 986. Methodology for creating an automated system for operational diagnostics of the state of technological equipment (work of science)]. Publ. dated May 28, 2015, [in Russian].
 4. Leonenkov, A.B. Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzTECH [Fuzzy modeling in MATLAB and FuzzTech]. – St.Petersburg: BHV-Petersburg, 2003. – 736 p., [in Russian].
 5. Abdel-Ghafar H.M., Abdel-Aal E.A., Ibrahim M.A.M., El-Shall H., Ismail A.K. Purification of high iron wet-process phosphoric acid via oxalate precipitation method // Hydrometallurgy, 2019. Vol. 184, No 7. P.236.
 6. Aguel S., Meddeb Z., Jeday M.R. Parametric study and modeling of cross-flow heat exchanger fouling in phosphoric acid concentration plant using artificial neural network // Journal of Process Control, 2019. Vol. 84. P.133-145.
 7. [?] Data Democracy: At the Nexus of Artificial Intelligence, Software Development and Knowledge Engineering Edited by Feras A. Batarseh // Academic Press. – 2020. Vol.2, No 1. P.266.
 8. Khamparia A., Pandey B., Pandey D. K., Gupta D., Khanna A., Hugo V. Comparison of RSM, ANN and fuzzy logic for extraction of oleonic acid from ocimum sanctum // Computers in Industry, 2020. Vol. 117. P.24-26.
 9. Offermans T., Szymańska E., Buydens L.M.C., Jansen J.J. Synchronizing process variables in time for industrial process monitoring and control // Computers & Chemical Engineering, 2020. Vol. 140. P.25-28.
 10. Rafiei M., Ricardez-Sandoval L.A. Integration of design and control for industrial-scale applications under uncertainty: a trust region approach // Computers & Chemical Engineering, 2020. Vol. 141. P.25-27.
 11. Silhavy F., Radek T. Artificial Intelligence and Algorithms in Intelligent Systems // Editors: Proceedings of 7th Computer Science On-line Conference, 2018. Vol. 2. P.118-121.
 12. Silhavy F., Radek T. Cybernetics and Automation Control Theory Methods in Intelligent Algorithms // Proceedings of 8th Computer Science On-line Conference, 2019. Vol. 3, No. 17. P.19-21.
 13. Suleimenov B. A, Sugurova L. A., Suleimenov A. B. Intelligent systems of optimal control and operational diagnostics (methods of synthesis and application) // Shikula: Almaty, 2016. – P.207.
 14. Yang Li, Jianhua Zhang, Wu Qiong. Adaptive Sliding Mode Neural Network Control for Nonlinear Systems. Emerging Methodologies and Applications in Modelling // Academic Press, 2018. Vol.1. P.186.
 15. Chang D, Liu J, Mao N, Ge S. Measurement and analysis of virgin-rock temperature in Huanren metal mine // In: Proceedings of the Third International Symposium on Mine Safety Science and Engineering. – Montreal, QC, Canada, 2016. – P. 204.
 16. He G., Dang Y., Zhou L., Dai Y., Que Y., Ji X. Architecture model proposal of innovative intelligent manufacturing in the chemical industry based on multi-scale integration and key technologies // Computers & Chemical Engineering, 2020. Vol. 141. P.45-48.

17. Mark K., Robert O. Software Engineering for Embedded Systems. // Newnes, 2019. Vol.12. P.154
18. Paulino N.M.G., Foo M., Kim J., Bates D.G. On the stability of nucleic acid feedback control systems // Automatica, 2020. Vol. 119. P.67-68.
19. Trabelsi W., Tlili A. Phosphoric acid purification through different raw and activated clay materials (Southern Tunisia) // Journal of African Earth Sciences, 2017. Vol. 129. P.647-658.