

АВТОМАТИКА. ЕСЕПТЕУ ТЕХНИКАСЫ
АВТОМАТИКА. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
AUTOMATION. COMPUTER TECHNOLOGY

DOI 10.51885/1561-4212_2024_4_170

MFTAA 50.43.15

К.С. Кульниязова¹, Л.Г. Рзаева², Г.А. Абитова², О.К. Аймухамбетов², Н.К. Ердыбаева³¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан*E-mail: k_korlan@mail.ru*²Astana IT University, Астана, Қазақстан*E-mail: l.rzayeva@astanait.edu.kz**E-mail: abitova.gul@gmail.com***E-mail: aimukhambetov.o@gmail.com*³Шығыс Қазақстан мемлекеттік техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан*E-mail: nyerdybayeva@ektu.kz***СУДЫ ЭЛЕКТР ЭРОЗИЯСЫН ТАЗАРТУ ПРОЦЕСІН БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІ
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ
ОЧИСТКОЙ ВОДЫ****CONTROL SYSTEM FOR THE PROCESS OF ELECTROEROSION
WATER PURIFICATION**

***Аңдатпа.** Табиғи және өндірістік ағынды суларды зиянды қоспалардан тазарту өзекті міндет болып табылады. Суды тазартудың классикалық әдістерінің бірқатар кемшіліктері бар: реагенттердің жоғары шығыны; мембраналарды мезгіл-мезгіл ауыстыру қажеттілігі; мембраналар мен реагенттердің жоғары құны; жабдықты орналастыру үшін үлкен аумақтар қажет; су көздерін улы заттар мен еріген тұздардан тиімді тазарту мүмкін емесі. Соңғы уақытта суды тазарту үшін электр энергиясын қолдану ерекше қызығушылық тудыруда, соның ішінде суды электроэрозиялық тазарту. Тазарту процесін басқару және тиімділігін арттыру үшін басқару жүйелері жасалады. Мақалада әзірленген басқару жүйесі суды электроэрозиялық тазарту процесінің сызықтық емес моделіне негізделген. Модельдің сызықтануы PID реттеуімен басқару жүйесін құруға мүмкіндік берді.*

***Түйін сөздер:** суды электроэрозиялық тазарту, басқару жүйелер, үйін сөздер, PID реттегіші.*

***Аннотация.** Очистка природных и промышленных сточных вод от вредных примесей является актуальной задачей. Классические способы очистки воды обладают рядом недостатков: высокий расход реагентов; необходимость периодической замены мембран; высокая стоимость мембран и реагентов; требуются большие площади, для размещения оборудования; невозможность эффективно очищать водные источники от токсичных веществ и растворенных солей. В последнее время, особый интерес вызывает применение электрической энергии для очистки воды, в том числе, электроэрозийная очистка воды. Для управления и повышения эффективности процесса очистки разрабатываются системы управления. Разработанная в статье система управления построена на основе нелинейной модели процесса электроэрозийной очистки воды. Линеаризация модели позволила создать систему управления с PID-регулированием.*

***Ключевые слова:** электроэрозийная очистка воды, системы управления, PID-регулятор.*

***Abstract.** Purification of natural and industrial wastewater from harmful impurities is an urgent task. Classical methods of water purification have a number of disadvantages: high consumption of reagents; the need for periodic replacement of membranes; high cost of membranes and reagents; large areas are required to accommodate equipment; the inability to effectively purify water sources from toxic substances and dissolved salts. Recently, the use*

of electric energy for water purification, including electroerosive water purification, has been of particular interest. Management systems are being developed to manage and improve the efficiency of the cleaning process. The control system developed in the article is based on a nonlinear model of the process of electroerosive water purification. The linearization of the model made it possible to create a control system with PID regulation.

Keywords: *electroerosive water treatment, control systems, PID controller.*

Kіpіcne. Суды тазартуға арналған электроэрозиялық тазарту әдісі салыстырмалы түрде жаңа және жақсы зерттелмеген. Ол тазартылған судағы электродтар арасында пайда болатын жоғары вольтты импульстарды қолдануға негізделген. Осы процестің нәтижесінде судағы ластаушы бөлшектерді механикалық түрде ыдырататын судағы металл шарлардың бетінде жарылғыш разрядтар пайда болады. Бұл процесс судан зиянды қоспаларды кетіре алатын көптеген иондар мен радикалдардың пайда болуына әкеледі.

Бұл әдістің артықшылықтарының бірі суды әртүрлі ластаушы заттардан, соның ішінде бактериялардан, вирустардан, органикалық және бейорганикалық қосылыстардан тазартудағы жоғары тиімділігі болып табылады. Дегенмен, әдістің тиімділігі ластаушы заттардың концентрациясы, олардың мөлшері мен пішіні, сондай-ақ қысым мен өңдеу уақыты сияқты параметрлерге байланысты болуы мүмкін.

Әдістің салыстырмалы түрде төмен энергия сыйымдылығына қарамастан, оның экономикалық тиімділігіне әсер етуі мүмкін арнайы жабдықты пайдалану қажет. Сонымен қатар, әдіс суда металл моншақтардың болуын талап етеді, олар өздігінен ластаушы болуы мүмкін.

Тұтастай алғанда, суды тазартуға арналған электроэрозиялық тазарту әдісі суды тазартудың неғұрлым тиімді және үнемді әдістеріне әкелуі мүмкін зерттеудің перспективалы саласы болып табылады.

Әдебиеттерге шолу. Су көздерін зиянды қоспалардан тазарту өзекті міндет болып табылады. Бұл мәселеге арналған басылымдар саны әр жылмен бірге өсуде (Akter, 2017, Delcolle, 2017). Бұл мәселені шешу үшін суды тазартудың әртүрлі және танымал әдістері қолданылады: кері осмос, коагуляция, ион алмасу тұндыру, аэрация, тұндыру және т.б. (Тменова Т., 2019). Аталған әдістердің әрқайсысының бірқатар артықшылықтары мен кемшіліктері бар. Елеулі кемшіліктердің ішінде мыналарды атап өтуге болады: реагенттердің жоғары шығыны; мембраналарды мезгіл-мезгіл ауыстыру қажеттілігі; мембраналар мен реагенттердің жоғары құны; жабдықты орналастыру үшін үлкен аумақтар қажет; және ең маңызды кемшілігі – бұл әдістердің көмегімен су көздерін еріген құрамдағы зиянды қоспалардан тазарту іс жүзінде мүмкін емес (немесе тиімді емес) судағы жағдай.

Жақында, зерттеушілердің қызығушылығы су көздерін тазарту үшін электр энергиясын қолдануға бағытталған (Moilanen, 2019; Rehman, 2015). Электр энергиясын пайдалануға негізделген осындай әдістердің бірі – тазартылатын судағы металл шарлар қабатын электроэрозиялық өңдеу арқылы суды тазарту. Суды тазарту үшін электр эрозиясын қолданудың қызығушылығы-бұл әдіс арзан шикізатқа негізделген (металл шарлар) және салыстырмалы түрде төмен энергия сыйымдылығымен сипатталады. Суды тазартудың электроэрозиялық әдісін қолданудың негізгі бағыты өнеркәсіптік ағынды суларды оларда еріген заттардан тазарту болып табылады.

Сонымен, жұмыста машина жасау кәсіпорындарының ағынды суларын тазарту үшін суды тазартудың электроэрозиялық әдісін қолдану ұсынылады, (Sechi, 2016) мақалада жылу желілерінің су тазарту жүйелерінде суды тазартудың электроэрозиялық әдісін қолдану перспективалары сипатталған, басылымдарда (Krinitsyn, 2016) өнеркәсіптік ағынды суларды ауыр металл иондарынан суды тазартудың электроэрозиялық әдісі арқылы тазарту бойынша зерттеулердің нәтижелері келтірілген. Сонымен қатар, соңғы жылдардағы зерттеулер табиғи суларды құрамындағы гуминдік заттар, силикаттар және ауыр металл иондары сияқты зиянды қоспалардан тазарту үшін электроэрозия әдісін сәтті қолдануға арналған, олар физика-химиялық әсерлерге төзімді коллоидты ерітінділер түзе алады (Тао, 2020).

Суды тазарту үшін электроэрозия процесін қолданудың негізгі мақсаты-суда еритін зиянды қоспаларды ерімейтін тұнбаға айналдыру, содан кейін оны тұндыру және сүзу сияқты классикалық әдістер арқылы судан шығару (Надеждин, 2020).

Материалдар және зерттеу әдістері. Электроэрозиялық су тазарту қондырғысын басқару жүйесін құру үшін басқару объектісі түріндегі процестің математикалық моделін жасау қажет. Бұл кіріс және шығыс айнымалылар арасындағы байланысты бағалау және процестің ақпараттық моделін құру арқылы жүзеге асырылуы мүмкін (Nadezhdin I.S., Parasidero D., 2016). Суды электроэрозиялық тазартуда жүретін процестердің күрделілігіне байланысты процестің ақпараттық құрылымы электроэрозиялық суды тазарту қондырғысын, тұндырғышты және сүзгіні қамтитын блоктар немесе құрылғылар жиынтығы түрінде көрсетілді. Процестің математикалық моделін жасау үшін әрбір блоктың (аппараттың) кіріс және шығыс айнымалыларын анықтау, әрбір блоктың ішінде болып жатқан физикалық процестерді сипаттау, блоктардың кіріс және шығыс айнымалылары арасындағы байланысты орнату қажет.

Мысалы, электроэрозиялық су тазарту процесінде су тазарту қондырғысының кіріс айнымалылары болуы мүмкін: кернеу, импульс жиілігі, шар диаметрі, шардың айналу жылдамдығы, су температурасы, судағы ластаушы концентрация және т.б. Бұл блоктың шығыс айнымалылары болуы мүмкін: сүзілген судың мөлшері, өңделген шарлар саны, тазартылған судағы ластаушы заттардың концентрациясы және т.б.

Тұндырғыш үшін кіріс айнымалылары болуы мүмкін: тазартылған судың берілу жылдамдығы, эрозия өнімінің концентрациясы, судың температурасы, кешігу уақыты және т.б. Шығарылатын айнымалылар: түзілген шөгінділердің мөлшері, тазартылған судағы ластаушы заттардың концентрациясы және т.б. Сүзгі үшін кіріс айнымалылар болуы мүмкін: тазартылған судың берілу жылдамдығы, толтырғыштың диаметрі, оның тығыздығы және т.б. Шығарылатын айнымалылар: жойылған қалқымалы заттардың мөлшері, тазартылған судағы ластаушы заттардың концентрациясы және т.б.

Осындай деректер негізінде басқару объектісі ретінде процестің математикалық моделін жасауға және оны басқару жүйесін синтездеу үшін келесі параметрлерді (электроэрозиялық су тазарту қондырғысының жұмыс параметрлерін оңтайландыру және суды максималды тазартуды қамтамасыз ету, тиімділігі және т.б.) қолдануға болады. Тұндырғыш пен сүзгі үшін жалпы суды тазарту процесіне әсер ететін тиісті кіріс және шығыс параметрлерін анықтауға болады. Басқару объектісі ретінде процестің ақпараттық моделін блок-схема түрінде көрсетуге болады, онда әрбір блок құрылғылардың біріне сәйкес келеді. Әрбір блоктың ішінде кіріс және шығыс параметрлерін, сонымен қатар процеске әсер ететін басқа факторларды ескере отырып, процестің математикалық модельдері ұсынылуы мүмкін (Надеждин, 2020). Мұндай ақпараттық модельді электроэрозиялық су тазарту қондырғысын басқару жүйесін әзірлеу үшін пайдалануға болады, ол технологиялық параметрлерді автоматты түрде реттейді және оның тиімділігін арттырады.

1-суретте суды тазартудың электроэрозиялық процесінің құрылымдық схемасы процессте қолданылатын құрылғыларды ажырату арқылы көрсетілген (1-кесте).



1-сурет. Суды тазартудың электроэрозиялық процесінің құрылымдық схемасы
Ескерту (Надеждин, 2020) негізінде құрастырылған

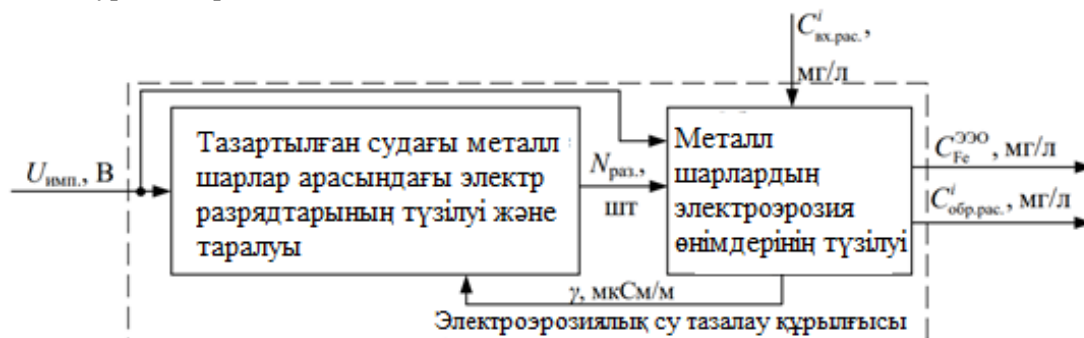
1-кесте. Кіріс және шығыс айнымалылары

Айнымалылар ағыны/вектор	Айнымалы	Айнымалының атауы	Сипаттамасы
$\overline{\Phi_{вх.рас.}}$	$Q_{вх.рас.}$	Кіріс ағыны (ластанған) сулы ерітінді	Кіріс айнымалы
	$T_{вх.рас.}$	Кіретін (ластанған) судың температурасы	Кіріс айнымалы
	C_i вх.рас.	Қоспалардың концентрациясы кіріс (ластанған) сулы ерітінді	Кіріс айнымалы
$\overline{П_{имп.}}$	$U_{имп.}$	Берілетін электрлік импульстарды коректендіру кернеуі	Кіріс айнымалы
	$f_{имп.}$	Электрлік импульстарды қолдану жиілігі	Кіріс айнымалы
	$t_{имп.}$	Берілетін электрлік импульстардың берілу ұзақтығы	Кіріс айнымалы
$\overline{\Phi_{обр.рас.}}$	$Q_{обр.рас.}$	Өңделген сулы ерітіндіні тұтыну	Шығыс/Кіріс айнымалы
	$T_{обр.рас.}$	Өңделген сулы ерітіндінің температурасы	Шығыс/Кіріс айнымалы
	C_i обр.рас.	Өңделген сулы ерітіндідегі қоспалардың концентрациясы	Шығыс/Кіріс айнымалы
	$C_{ЭЭО}$ Fe	Өңделген сулы ерітіндідегі электрлік эрозия өнімдерінің концентрациясы	Шығыс/Кіріс айнымалы
$\overline{\Phi_{отс.рас.}}$	$Q_{отс.рас.}$	Тұндырылған сулы ерітіндінің шығыны	Шығыс/Кіріс айнымалы
	$T_{отс.рас.}$	Тұндырылған сулы ерітіндінің температурасы	Шығыс/Кіріс айнымалы
$\overline{\Phi_{вых.рас.}}$	C_i отс.рас.	Тұндырылған сулы ерітіндідегі қоспалардың концентрациясы	Шығыс/Кіріс айнымалы
	$Q_{вых.рас.}$	Шығатын суды тұтыну шығыны	Шығыс айнымалы
	$T_{вых.рас.}$	Шығатын судың температурасы	Шығыс айнымалы
$\overline{\Phi_{вых.рас.}}$	C_i вых.рас.	Шығатын сулы ерітіндідегі қоспалардың концентрациясы	Шығыс айнымалы
	$СН$	Құрылғы жұмыс жасайтын орта	Шығыс

		ауасындағы сутегі концентрациясы (көлем %)	айнымалы
<i>Ескерту – автормен құрастырылған</i>			

Суды тазартудың электроэрозиялық процесінің математикалық моделін жасау кезінде процесің екі кезеңнен тұратыны анықталды (Надеждин, 2020).

Бірінші кезең – су ерітіндісінде металл шарлар арасында электр разрядтарының пайда болуы және таралуы, ал екінші кезең – олардың арасындағы электр разрядтары нәтижесінде металл шарлардың электр эрозия өнімдерінің бөлінуі. Суды тазартудың электроэрозиялық процесінің математикалық моделі басқару объектісі ретінде ұсынылды және 2-суретте көрсетілген.



2-сурет. Басқару объектісі ретінде суды тазартудың электроэрозиялық процесінің математикалық моделі

Ескерту (Надеждин, 2020) негізінде құрастырылған

Аппараттағы электр эрозия өнімдерінің түзілу процесін сипаттау үшін дифференциалдық-алгебралық теңдеулер жүйесін жазуға болады (1) (Nadezhdin, I.S., 2016):

$$\begin{aligned}
 \frac{dC_{обррас}^i}{dt} &= \frac{Q_{обррас}}{V_{вр}} * (C_{вхрас}^i - C_{обррас}^i) \\
 \frac{dC_{Fe}^{ЭЭ0}}{dt} &= \frac{m_{Fe}^{ЭЭ0}}{V_{вр}} - \frac{Q_{обррас}}{V_{вр}} * C_{Fe}^{ЭЭ0} \\
 \frac{d\gamma}{dt} &= \frac{C_{обррас}^i}{k_\gamma} \\
 \frac{dm_{Fe}^{ЭЭ0}}{dt} &= 2 * N_{раз} * V_{лун} * \rho_{шар} \\
 V_{лун} &= 0.5 * \pi * R_{лун}^2 * h_{лун} \\
 d_{лун} &= (73,96 * d_{шар}^2 - 930,1 * d_{шар} + 3602) * q_{кан}^{0,2309} + \\
 &+ (27,16 * d_{шар}^2 + 218,1 * d_{шар} - 278,4) \\
 V_{в.р} &= (W_{ан} * L_{ан} * H_{ан}) - (m_{загр} * \rho_{шар}) \\
 h_{лун} &= \frac{q_{плав}}{C_{шар} * (T_{плав} - T_{шар}) * \rho_{шар}}, \\
 q_{плав} &= \frac{4,45 * k_{эф} * q_{кан}}{\pi * R_{лун}^2}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Шынында да, суды тазартудың электроэрозиялық процесінің бірінші және екінші кезеңдерінің математикалық модельдері өзара байланысты, өйткені бірінші кезеңнің

нәтижелері екінші кезеңнің параметрлеріне әсер етеді. Атап айтқанда, бірінші кезеңнің нәтижесінде алынған зиянды қоспалардың концентрациясы екінші кезең үшін кіріс параметр болып табылады, өйткені ол екінші кезеңде өңделген сулы ерітіндінің электр өткізгіштігінің өзгеруіне әсер етеді. Бұл өз кезегінде екінші кезеңнің тиімділігіне және алынған өнімдердің концентрациясына әсер етеді. Осылайша, суды тазарту процесін дұрыс болжау үшін осы модельдер арасындағы байланысты ескеру қажет.

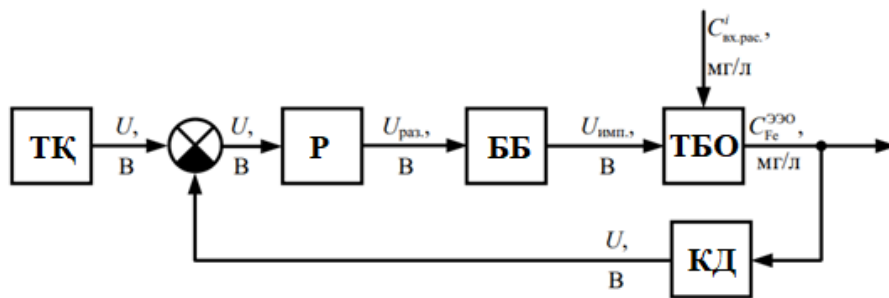
3-суретте электроэрозиялық су тазарту қондырғысын басқарудың автоматтандырылған жүйесінің функционалдық схемасы көрсетілген, ол қажетті функционалды элементтерден тұрады. Электроэрозиялық су тазарту қондырғысының резервуар-реакторы басқарудың технологиялық объектісі болып табылады және диэлектрлік материалдан жасалған. Реактор цистернасының ішінде басқару блогына қосылған екі электрод бар. Басқару блогында электроэрозиялық суды тазарту процесін басқару үшін қолданылатын электр импульстік генераторы бар.

Басқару жүйесі келесідей жұмыс істейді: бақыланатын айнымалының қажетті мәні (электр эрозия өнімдерінің концентрациясы) негізгі құрылғының көмегімен орнатылады. Өңделген сулы ерітіндідегі электр эрозия өнімдерінің концентрациясының ағымдағы мәні концентрация датчигі арқылы өлшенеді, ал сенсордан келетін сигнал белгіленген мәнмен салыстырылады.

Қазіргі уақытта болжамды модельдерге негізделген PID контроллерлері мен реттеуіштері Сәйкессіздік сигналы негізінде контроллер берілген электрлік импульстардың қажетті кернеу мәнін есептейді және басқару блогына берілетін сигналды жасайды.

Басқару блогы, өз кезегінде, басқарылатын айнымалының өзгеруіне әсер ететін, белгілі бір амплитуданың электрлік импульстар түрінде технологиялық басқару объектісіне басқару әрекетін жасайды. Процесті басқару үшін ең кең таралған болып табылады. PI және PID контроллерлері орнатудың қарапайымдылығына және техникалық іске асырудың қарапайымдылығына байланысты кеңінен қолданылады (Зарубин, 2020).

Процесті басқарудың әртүрлі тәсілдері бар, олардың бірі болжамды модельдерді пайдалану болып табылады. Осы тәсілдің негізінде ең тиімді реттеушіні анықтау үшін зерттеулер жүргізілді. Кейбір зерттеулер болжамдық модель контроллеріне негізделген басқару жүйелері



3-сурет. Электроэрозиялық су тазарту қондырғысын басқарудың автоматтандырылған жүйесінің функционалдық схемасы: ТҚ – негізгі технологиялық құрылғы, Р – реттеуші, ББ – басқару блогы, ТБО – технологиялық басқару орталығы, КД – түзілетін электр шарының концентрация датчигі
Ескерту – автормен құрастырылған

PID контроллерлеріне негізделген жүйелерге қарағанда әртүрлі технологиялық процесстерді басқаруда тиімдірек екенін көрсетті.

Басқару жүйелерінің тиімділігін арттыру үшін анық емес логиканы қамтитын

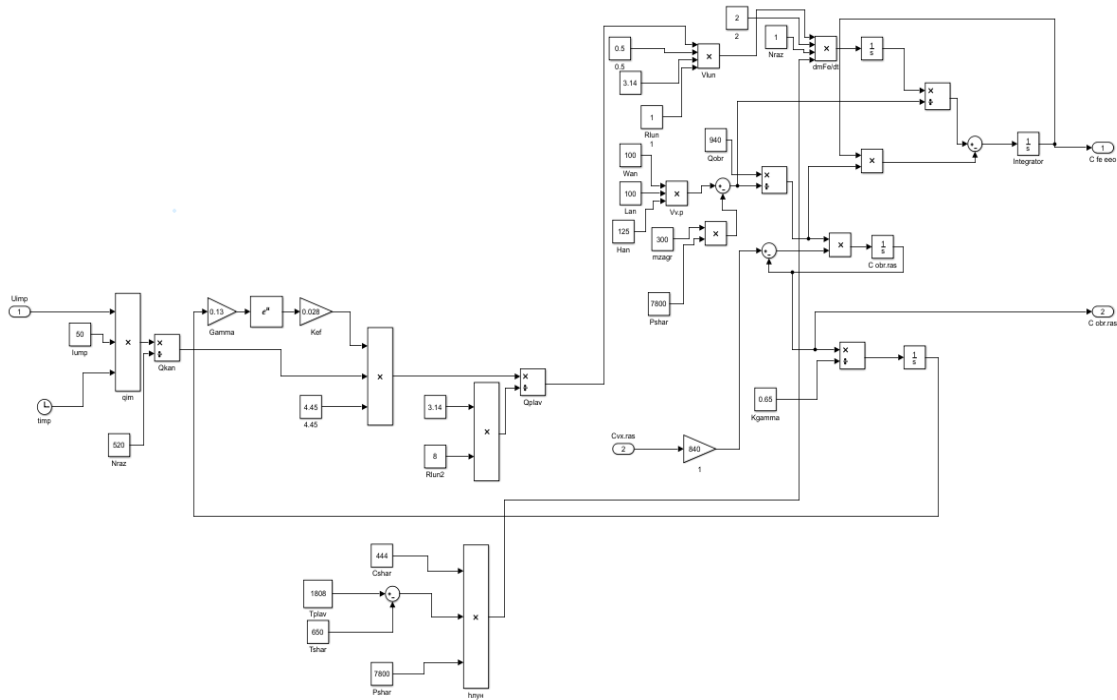
«гибридті» PID контроллерін пайдалануға болады. Суды тазартудың электроэрозиялық процесінің математикалық моделін құру барысында алдымен MatLab бағдарламасының Simulink опциясында жоғарыдағы аппараттағы электр эрозия өнімдерінің түзілу процесін сипаттау үшін қолданылған дифференциалдық-алгебралық теңдеулер жүйесін құрып аламыз. Дифференциалдық-алгебралық теңдеулер жүйесінде құрылған Simulink сызбасы 4-суретте көрсетілген.

Simulink сонымен қатар сызықтық және сызықтық емес тұрақтылықты талдау, параметрлерді оңтайландыру және басқару жүйесінің оңтайлы синтезі сияқты әртүрлі әдістерді пайдаланып үлгілерді талдауға және оңтайландыруға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, Simulink-те көптеген дайын блоктар мен кітапханалар бар, бұл автоматты басқаруда, электроникада, механикада және басқа салаларда әртүрлі қолданбаларға арналған үлгілерді жылдам жасауға мүмкіндік береді. Әрі қарай болжамды модельді қалыптастыру үшін сызықты емес жүйені сызықтық жүйемен ауыстыру әдістері қолданылды. Жалпы жағдайда, сызықтық жүйені талдау және жобалау үшін сызықтық басқару теориясының әдістерін қолдануға мүмкіндік беретін белгілі бір жұмыс нүктесіне жақын орналасқан сызықты емес жүйені сызықтық жүйемен ауыстыруға мүмкіндік береді.

Simulink-те басқару объектілерін сызықтандыру – басқару объектілерінің сызықты емес динамикалық үлгілерін берілген жұмыс нүктесіне жақын жерде сызықтық модельдерге түрлендіру процесі. Сызықтық модельдер басқару жүйесінің тұрақтылығы мен орнықтылығын талдау үшін, реттегіштерді жобалау және баптау үшін және басқа мақсаттарда пайдаланылуы мүмкін.

Simulink бағдарламасында басқару объектілерін сызықтандыру Linearization блогының көмегімен орындалады, ол берілген кіріс және шығыс нүктелері негізінде сызықтық басқару объектісінің үлгілерін автоматты түрде есептейді, сонымен қатар сызықтандыруды баптау опциялары.

Жүйені сызықтандыру процесінде сызықты емес элементтер олардың сызықтық ұқсастарымен ауыстырылады, ал сызықтық күй айнымалыларына, жүйенің кірістері мен шығыстарына қатысты орындалады. Бұл тұрақтылық теориясы, оңтайлы басқару теориясы, реттеу теориясы және т.б. сияқты сызықтық басқару теориясының стандартты әдістерін пайдаланып талдауға болатын сызықтық модельді алуға мүмкіндік береді. Сызықтықтандырудан кейін басқару объектісі моделін басқару жүйесін одан әрі талдау және жобалау үшін пайдалануға болады.

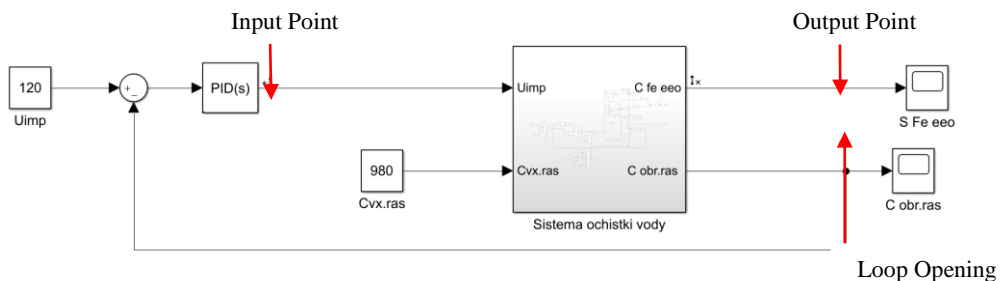


4-сурет. Simulink жүйесінде құрылған схема

Ескерту – автормен құрастырылған

Электроррозиялық әдіспен суды тазалау процесінің сызықтандырылған үлгісі 5-суретте көрсетілген. Модельдің бұл фрагментінде PID Controller блогы реттеуіш болып табылады, ал Subsystem блогы басқару объектісі болып табылады. Сызықтандыру үшін кіру және шығу нүктелерін орнату керек. Simulink бағдарламасында кіріс және шығыс сигналдарын анықтау үшін Порттар және ішкі жүйелер кітапханасындағы кіріс және шығыс блоктарын пайдалануға болады. Кіріс блоктарын басқа блоктармен бірге пайдалануға болады, мысалы, Sum блогы. Деректер күй-кеңістік матрицалары түрінде немесе LTI нысаны түрінде болғандықтан, қосымша талдау үшін Control System Toolbox өніміндегі функцияларды пайдаландым.

Сызықтық енгізу кірісін көрсету үшін, PID контроллері блогының шығысын таңдап, Linear Analysis Points > Input Perturbation блогын таңдадым. Сызықтық шығысын көрсету үшін, Су тазалау жүйесі блогының шығысын таңдап, Сызықтық талдау нүктелері > Ашық цикл шығысы тармағын таңдадым.



5-сурет. Электроррозиялық әдіспен суды тазалау процесінің сызықтандырылған үлгісі

Ескерту – автормен құрастырылған

Simulink – бұл A , B , C және D күй-кеңістік матрицалары түріндегі сызықтық модельдерді шығару үшін *linmod*, *linmod2* және *dlinmod* функцияларын қамтамасыз ететін өнім. Бұл матрицалар кіріс және шығыс векторлары арасындағы сызықтық қатынасты да сипаттайды, жүйенің күйі ретінде және теңдеулер түрінде көрсетуге болады. Мұндағы,

$$x = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

Мұнда x , u және y сәйкес күйге, кіріс және шығыс векторларына сәйкес келеді. Мысалы, A , B , C және D матрицаларын пайдаланып Simulink жүйесінде сызықтандырылған үлгі жасау үшін *lmod* функциясын пайдалануға болады.

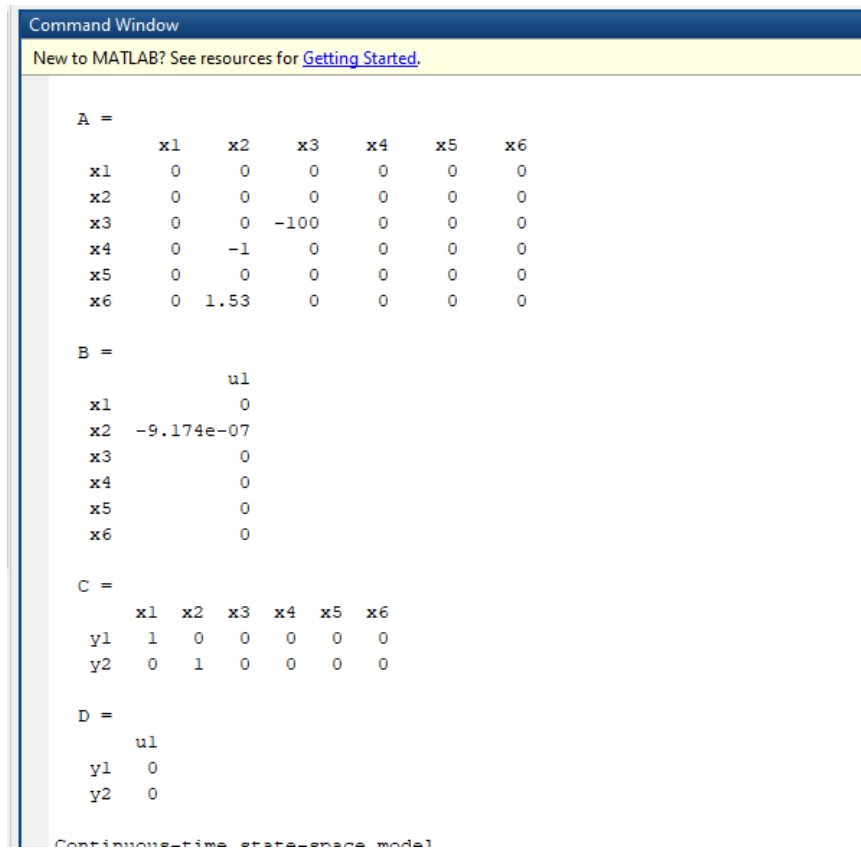
6-суретте көрсетілген электроэрозиялық әдіспен суды тазалау процесінің үлгісін тағы басқа жолмен сызықтандыру үшін файлды “*lmod*” атауымен сақтап аламыз. Әрі қарай командалық терезеге келесі:

$[A, B, C, D] = \text{linmod}('lmod')$ командасын береміз.

Нәтижесінде келесі 6-суретте көрсетілгендей электроэрозиялық су тазалау жүйесінің сызықтандырылған түрінің матрицасын аламыз.

```
f =  
  
      9.174 s + 0.7  
-----  
      s^2 + 9.174 s + 0.7  
  
Continuous-time transfer function.
```

Су тазалау жүйесінің берілу функциясын анықталды.



```
Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

A =
      x1      x2      x3      x4      x5      x6
x1      0      0      0      0      0      0
x2      0      0      0      0      0      0
x3      0      0     -100      0      0      0
x4      0     -1      0      0      0      0
x5      0      0      0      0      0      0
x6      0     1.53      0      0      0      0

B =
      u1
x1      0
x2     -9.174e-07
x3      0
x4      0
x5      0
x6      0

C =
      x1      x2      x3      x4      x5      x6
y1      1      0      0      0      0      0
y2      0      1      0      0      0      0

D =
      u1
y1      0
y2      0

Continuous-time state-space model
```

6-сурет. Simulink бағдарламасында құрастырылған электроэрозиялық су тазалау жүйесінің пайдасызықтандырылған түрінің матрицасы

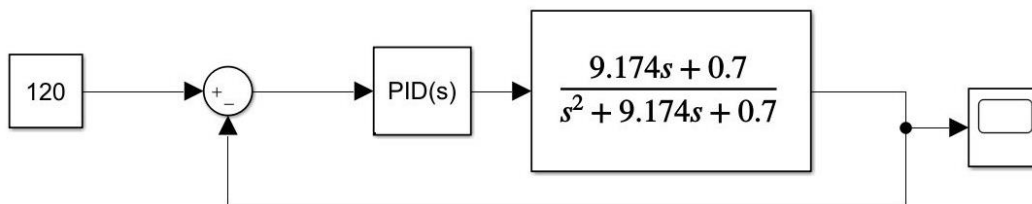
Ескерту – автормен құрастырылған

PID (Proportional-Integral-Derivative) – процестерді автоматты реттеу үшін қолданылатын басқару алгоритмі. Ол қажетті мән мен ағымдағы мән арасындағы айырмашылық негізінде шығыс сигналын басқару үшін үш параметрді, пропорционалды күшейтуді (P), интегралды күшейтуді (I) және туынды күшейтуді (D) пайдаланады. PID тюнері процесті оңтайлы басқару үшін осы параметрлерді реттеуге мүмкіндік береді. Ол өнеркәсіптік өндіріс, автоматты басқару, робототехника және т.б. сияқты әртүрлі салаларда қолданылады.

PID тюнерін пайдалану үшін басқарылатын процесс туралы деректерді жинау және оны бағдарламаға беру қажет. PID Tuner PID параметрлерін реттеу және шығысты визуализациялау үшін графикалық пайдаланушы интерфейсін қамтамасыз етеді. PID Tuner - ең аз баптау күшімен ең жақсы нәтиже алуға мүмкіндік беретін қуатты автоматты процесті басқару құралы (Леонов, 2019).

PID Tuner қолданбасы тиімділік пен беріктік арасындағы тепе-теңдікті сақтай отырып, PID контроллерінің кірістерін автоматты түрде реттейтін құрал болып табылады. Бұл қолданба арқылы PI, туынды сүзгісі бар PID немесе 2-DOF PID контроллері сияқты контроллер түрін таңдауға болады. PID Tuner көмегімен контурдың өткізу қабілеттілігі мен фазалық маржасын баптау, сондай-ақ белгіленген нүктені қадағалау немесе шуды қабылдамау арқылы контроллердің жұмысын интерактивті түрде жақсартуға болады. PID Tuner қосымшасын іске қосу үшін алдымен Simulink терезесінде сызбамызды алдыңғы

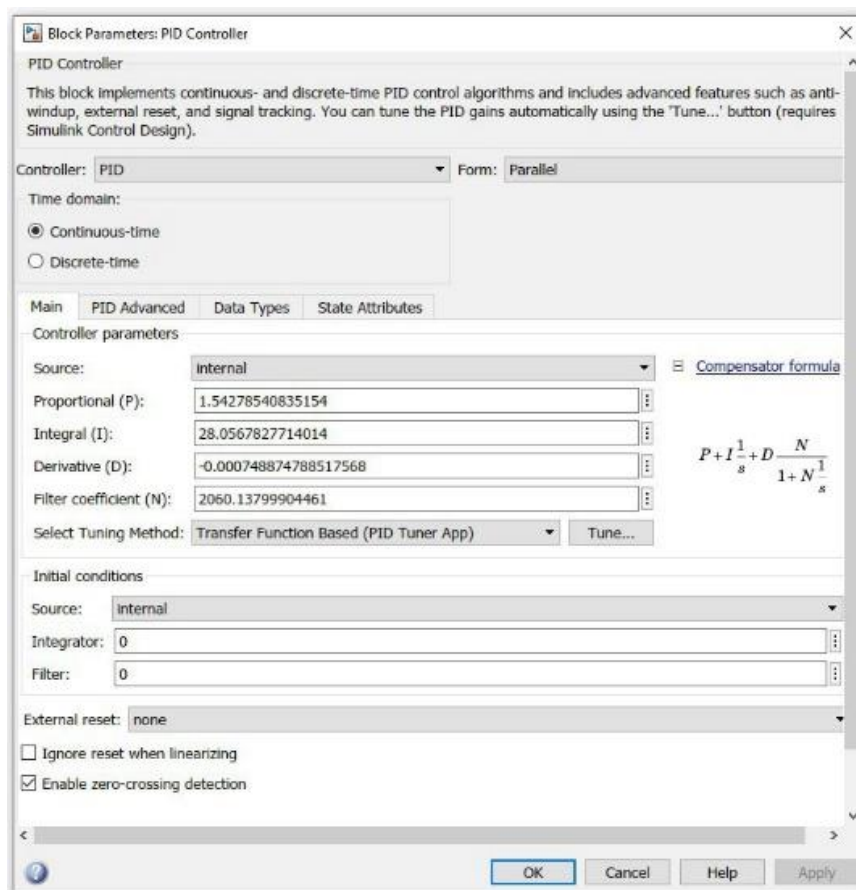
нәтижеден алған беріліс функциясы бойынша қайта жинаймыз. 7-суретте Simulink терезесіндегі беріліс функциясы бойынша құрылған басқару объектісін көруге болады.



7-сурет. Simulink терезесінде құрылған басқару объектісі

Ескерту – автормен құрастырылған

Әрі қарай қосымшаны пайдалану үшін PID контроллердің параметрлерін өзгерту терезесінде қосымшаны іске қосамыз. PID Tuner қосымшасы берілген функция бойынша оңтайлы мәндерді қабылдап, проектке анализ жасайды. PID контроллерінің параметрлері 8-суретте көрсетілген.

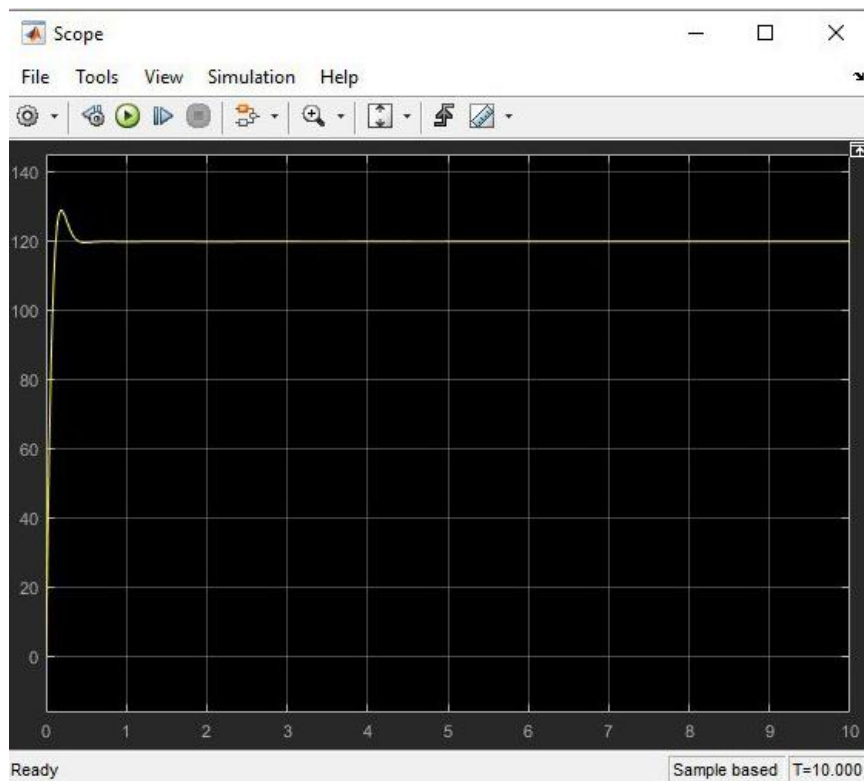


8-сурет. PID контроллерінің оңтайлы параметрлері

Ескерту – автормен құрастырылған

Нәтижелері және оларды талқылау. Келесі 9-суретте Simulink терезесінде жасаған сұлбаның нақты шешімі көрсетілген. Яғни, PID Tuner қосымшасының анализі бойынша

табылған параметрлер электроэрозиялық су тазалау жүйесін басқару объектісінің оңтайлы шешімі болып табылады.



9-сурет. PID Tuner қосымшасы бойынша табылған электроэрозиялық су тазалау жүйесін басқару объектісінің тиімді шешімі

Ескерту – автормен құрастырылған

Автоматты реттеу жүйелері объектіге жүктемелердің барлық диапазонында тұрақты болуы керек, бірақ олардың жұмыс істеуі үшін белгілі бір сапа көрсеткіштері қажет. Бұл көрсеткіштерге қайта реттеу уақыты, тербеліс көрсеткіші және әлсіреу дәрежесі кіреді. Қайта реттеу уақыты реттелетін шама белгіленген мәнге алдын ала белгіленген мән шегінде дәлдікпен жететін уақыт ретінде анықталады, әдетте тапсырма сигналы бойынша секіру шамасының 3 %-дан 5 %-на дейінгі диапазонда қабылданады. Қайта реттеу дегеніміз салыстырмалы бірліктермен немесе пайыздармен көрсетілген тұрақты мәннен максималды ауытқу болып табылады. Бұзушылық әсерді пысықтау кезінде қайта реттеу шамасы келесі арақатынастан айқындалады (2):

$$\sigma = \frac{H - H_{уст}}{H_{уст}} \cdot 100\% = \frac{130 - 120}{120} \cdot 100\% = 8,33,$$

мұндағы, H_{max1} – өтпелі қисықтың екінші амплитудалық шыңы, $H_{уст}$ – өтпелі қисықтың алғашқы амплитудалық шыңы.

Тербеліс жиілігі тұйық жүйенің жиілік беру функциясының модулінің максимумын сипаттайды және сол арқылы жүйенің тербеліс қасиеттерін сипаттайды. Тербеліс жиілігін келесі анықтаймыз (3).

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{6,28}{10} = 0,628,$$

мұндағы T – тербеліс процестері үшін тербеліс кезеңі.

Әлсіреу дәрежесі – тербелістердің қаншалықты әлсірегенін көрсетеді және формула бойынша анықталады (4).

$$k = \frac{|H_{max1} - H_{уст}|}{|H_{max2} - H_{уст}|} = \frac{|130 - 120|}{|100 - 120|} = 0,5,$$

мұндағы, H_{max1} – өтпелі қисықтың бірінші амплитудалық шыңы, H_{max2} – өтпелі қисықтың екінші амплитудалық шыңы.

Бұл көрсеткіштер автоматты реттеу жүйесінің өнімділігін және оның реттеу процесін тиімді басқару қабілетін бағалау үшін маңызды.

Қорытынды. Процесті басқару жүйесін синтездеу үшін суды тазартудың электро-эрозиялық процесінің математикалық моделі басқару объектісі ретінде қолданылды. Математикалық модель ықтималдық жасушалық автоматтар әдісіне негізделген және берілген электр импульстарының кернеуінің өзгеруіне және өңделетін сулы ерітіндідегі зиянды қоспалардың концентрациясына байланысты электр эрозиясы өнімдерінің концентрациясының өзгеру динамикасын көрсетеді және бейсызықтық алгебралық және дифференциалдық теңдеулер жүйесін ұсынады. Модельді сызықтық ету Matlab көмегімен жүзеге асырылады. PID реттеуі бар сызықтық модель негізінде жасалған басқару жүйесі қажетті сапа көрсеткіштерін көрсетті.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

Әдебиеттер тізімі

- Akter A., Goto M., Mohd Noor M.J.M., Muzahidul Islam A.K.M., Motoo U., Ya Z.Z., Parvez A. (2017) Immobilization of heavy metals in tannery sludge by subcritical water treatment. Chemical Engineering Transactions. – 2017. – № 56. – P. 265-270. <https://doi.org/10.3303/CET1756045>
- Delcolle, R. (2017) A comparison between coagulation and ultrafiltration processes for biodiesel wastewater treatment / R. Delcolle, M.L. Gimenes, C. Fortulan, W. Moreira, N. Martins, N. Pereira // Chemical Engineering Transactions. – 2017. – № 57. – P. 271-276. <https://doi.org/10.3303/CET1757046>
- Demirci, Y. (2014) Textile wastewater conductivity control of electrocoagulation process using MatLab / Simulink. Global NEST Journal. – 2014. – № 16. – P. 348-353. <https://doi.org/10.30955/gnj.001325>
- Krinityn, N.S., N.S. Krinityn, A.D. Uvarova, V.F. Dyadik, A.G. Goryunov, I.S. Nadezhdin (2016) Plant Identification in the Closed-loop Control System. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. – 2016. – Vol. 1. – P. 229-233
- Lutchmiah, K., A.R.D. Verliefe, K. Roest, L.C. Rietveld (2014) Forward osmosis for application in wastewater treatment: A review. Water research. 2014. – № 58. – P. 179-197. DOI:10.1016/j.watres.2014.03.045
- Moilanen, Y., Paasila, M., & Lappalainen, P. (2019). Water purification system for the Electric Discharge Machine (EDM). VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Research Report Vol. VTT-R-05845-15
- Nadezhdin, I.S., Goryunov A.G., F. Manenti, A.O. Ochoa Bique (2016) Mathematical modeling of EDM method of water purification. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. 2016. – Vol. 1. – P. 254-258.
- Nadezhdin I.S., Papisidero D., Goryunov A.G., Manenti F. (2016) Optimisation of EDM process for water purification. Chemical Engineering Transactions. – 2016. – Vol. 52. – P. 325-330. <https://doi.org/10.3303/CET165205>
- Rehman, A. Operational parameter influence on heavy metal removal from metal plating wastewater by electrocoagulation process / A. Rehman, M. Kim, A. Reverberi, B. Fabiano // Chemical Engineering Transactions. – 2015. – № 43. – P. 2251-2256. <https://doi.org/10.3303/CET1543376>
- Sechi, E., A. Vacca, M. Mascia, S. Palmas (2016) Nickel-based nanoporous electrodes for water treatment. Chemical Engineering Transactions. – 2016. – № 47. – P. 97-102 <https://doi.org/10.3303/CET1647017>
- Tmenova T. (2019) Experimental characterization of the underwater pulsed electric discharge Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2019
- Tao J., Ni J., Shih A.J. (2020) Modeling of the Anode Crater Formation in Electrical Discharge Machining. Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2020. – Vol. 134. – P. 207-218. DOI:10.1115/1.4005303
- Upadhyayula V.K.K, S. Deng, M.C. Mitchell, G.B. Smith (2009) Application of carbon nanotube technology for removal of contaminants in drinking water: A review. Science of the Total Environment. – 2009. – № 408. – P. 1-13 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.09.027>
- Грудяева, Е.К. Математическое моделирование и управление биохимическими процессами очистки

- сточных вод / Е.К. Грудяева, С.Е. Душин, Н.Н. Кузьмин // Актуальные проблемы гидролитосферы (диагностика, прогноз, управление, оптимизация и автоматизация): Третий национальный научный форум «Нарзан – 2015». – Кисловодск. – 2015. – С. 465-485.
- Зарубин, В.С. (2020) Математическое моделирование в технике: Учебник для вузов. - М.: МГТУ, 2020. – 95 с. // Zarubin, V.S. (2020) Matematicheskoe modelirovanie v tekhnike: Uchebnik dlya vuzov.- М.: MGTU, 2020.- 95 р
- Кожевников, А.Б. (2020) Промышленная и эпидемиологическая безопасность при обеззараживании питьевой воды – Водоснабжение и сан. техника. – 2020, № 5, 21–24 // Kozhevnikov, A.B. (2020) Promyshlennaya i epidemiologicheskaya bezopasnost' pri obezzarazhivanii pit'evoy vody - Vodospabzhenie i san.tekhnika.-2020. – № 5, 21–24.
- Леонов С.Н. (2019) Моделирование систем в MATLAB / Ю. Ф. Лазарев. Леонов С.Н. (2019) – Томск: ТПУ, 2019. // Leonov S.N. (2019) Modelirovanie sistem v MATLAB / YU. F. Lazarev. Leonov S.N. (2019) – Tomsk: TPU, 2019.
- Надеждин, И.С. (2020) Автоматизированная система управления электроэрозионной водоочистой установкой с прогнозирующей моделью. - Томск: ТПУ, 2020 // Nadezhdin, I.S. (2020) Avtomatizirovannaya sistema upravleniya elektroerozionnoj vodoochistnoy ustanovkoj s prognoziruuyushchej model'yu.- Tomsk: TPU, 2020.
- Рябчиков Б.Е. (2018) Современная водоподготовка. – М.: ДеЛи принт, 2018.– 679 с. // Ryabchikov B.E. (2018) Sovremennaya vodopodgotovka. – М.: DeLi print, 2018.– 679 s.
- Тимофеев, В.Б. (2020) Компьютерное моделирование физических процессов в пакете MATLAB: Учебное пособие / В.Б. Тимофеев. - СПб.: Лань КИТ, 2020 // Timofeev, V.B. (2020) Komp'yuternoe modelirovanie fizicheskikh processov v pakete MATLAB: Uchebnoe posobie / V.B. Timofeev. - SPb.: Lan' KPT, 2020
- Фесенко Л.Н., Скрябин А.Ю., Бреус С.А., Пчельников И.В. (2017) Производственные испытания обеззараживания питьевой воды прямым электролизом. ВСТ. - 2017. - N 5, 15-20 // Fesenko L.N., Skryabin A.YU., Breus S.A., Pchel'nikov I.V (2017) Proizvodstvennye ispytaniya obezzarazhivaniya pit'evoy vody pryamym elektrolizom/. VST. - 2017. - N 5, 15-20.

Information about authors

Kulniyazova K.S. – senior-lector, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; k_korlan@mail.ru, +7 771 0010027

Rzayeva L.G. – associate professor, PhD, Astana IT University, Astana, Kazakhstan; l.rzayeva@astanait.edu.kz +7 777 5339169

Abitova G.A. – associate professor, PhD, Astana IT University, Astana, Kazakhstan;

Aimukhambetov O.K. – senior-lector, Astana IT University, Astana, Kazakhstan; aimukhambetov.o@gmail.com +7 778 5424332

Erdybaeva N.K. – professor, East Kazakhstan State Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, nyerdybayeva@ektu.kz, +7 771 414 6494
