



УДК 533.9.004.14; 621.039.6
DOI: 10.31643/2020/6445.41



МРПТИ 44.31.29

Плазмалық отын жүйесімен байытылған тәжірибелік цилиндр пеште көмірсутекті отынның жануын есептеу кезінде үш өлшемді математикалық модельдеуді тексеру

²Мессерле В. Е., ¹Белегенова С. А., ^{*1}Бодықбаева М.Қ., ¹Куйкабаева А. А.,
³Славинская Н., ¹Тастанбеков А. Қ.

¹ эл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

² эл-Фараби атындағы ҚазҰУ-дың эксперименттік және теориялық физика ҒЗИ, Алматы, ҚР

³ Германия атом энергетикасы агенттігі университеті, Мюнхен, Германия

* Корреспондент автордың электрондық поштасы: moldirbodykbaeva@gmail.com

Мақала келді: 22 қараша 2020
Сараптамалық шолу: 29 қараша 2020
Қабылданды: 14 желтоқсан 2020

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл жұмыста дәстүрлі және плазмамен белсендірілген жағдайлардағы қазандықтың жұмыс істеуі зерттелді. Жанармайды электротермохимиялық дайындау (ЖЭТХД) және жану процестерінің физикалық механизмінің түсініп, Cinar ICE бағдарламасының модельдеу мүмкіндігін тексеру үшін плазмалық отындық жүйемен (ПОЖ) жабдықталған, жылулық қуаты 3 МВт тәжірибелік пеште көмірдің жануына зерттеу жүргізілді. Жағуға алдын ала плазмалық дайындаудан өткен аэроқоспаның жану процесін зерттеу үшін жанармайдың плазма көзі орналасқан екі фазалы ағында термохимиялық алмасу кинетикасының механизмін бөлшектеп қарастыратын бір өлшемді Плазма-Көмір және пештің нақты геометриясы мен көмір бөлшектерінің жану процесінің кинетикасын үш өлшемді Cinar ICE компьютерлік бағдарламалары қолданылды. Есептеулер нәтижесінде ЖЭТХД процесіндегі газ бен бөлшектердің температурасының жылдамдығының таралуы, газ фазасы қоспаларының концентрациясы, легрленген көмір қалдығындағы көміртегінің концентрация және газдану деңгейі анықталды. Жануды плазмалық белсендіру алаудың жылу техникалық сипаттамаларына, жанармайдың механикалық жанбай қалған қалдығына және пеш шығысындағы азот оксидінің концентрациясына әсер ететіндігі анықталды. Көмірдің жануын модельдеуде Cinar ICE бағдарламасын пайдалану арқылы процесті тиімді сипаттауға қол жеткізуге болатыны дәлелденді.

Түйінді сөздер: Плазмалық белсендіру, оттық, жану процесін модельдеу, отын жүйесі, көміртегі.

	Авторлар туралы ақпарат:
Мессерле Владимир Ефремович	<i>Т.ғ.д. эл-Фараби атындағы ҚазҰУ-дың эксперименттік және теориялық физика ҒЗИ профессоры, Алматы, Қазақстан. Email: ust@physic.kz; ORCID ID: 0000-0003-4281-1429</i>
Белегенова Салтанат Әлиханқызы	<i>Ф.-м.ғ.д., эл-Фараби атындағы қазақ ұлттық университетінің профессоры, физика-техникалық факультеті, жылу физикасы және техникалық физика кафедрасы. Алматы, Қазақстан. Email: Saltanat.Bolegenova@kaznu.kz. ORCID ID: 0000-0001-5001-7773</i>
Бодықбаева Мәлдір Қабденқызы	<i>Магистр, докторант, эл-Фараби атындағы қазақ ұлттық университеті, физика-техникалық факультеті, жылу физикасы және техникалық физика кафедрасы. Алматы, Қазақстан. Email: moldirbodykbaeva@gmail.com ORCID ID: 0000-0002-1181-9797.</i>
Куйкабаева Айжан Аманғалиқызы	<i>PhD, эл-Фараби атындағы қазақ ұлттық университеті, физика-техникалық факультеті, жылу физикасы және техникалық физика кафедрасы. Алматы, Қазақстан. Email: a.kuikabaeva@gmail.com ORCID ID: 0000-0002-0905-4422.</i>
Славинская Надежда	<i>PhD, Германия атом энергетикасы агенттігі университетінің профессоры, Мюнхен, Германия. ORCID ID: 0000-0001-8682-2192. Email: Nadja.slavinskaya@dlr.de</i>
Тастанбеков Абзал Қайратұлы	<i>Магистр, докторант, эл-Фараби атындағы қазақ ұлттық университеті, физика-техникалық факультеті, жылу физикасы және техникалық физика кафедрасы. Алматы, Қазақстан. Email: tastanbekov91@mail.ru ORCID ID: 0000-0002-8595-1395.</i>

Кіріспе

Көмірдің плазмалық технологиямен тұтануын жетілдіріп, пайдалану

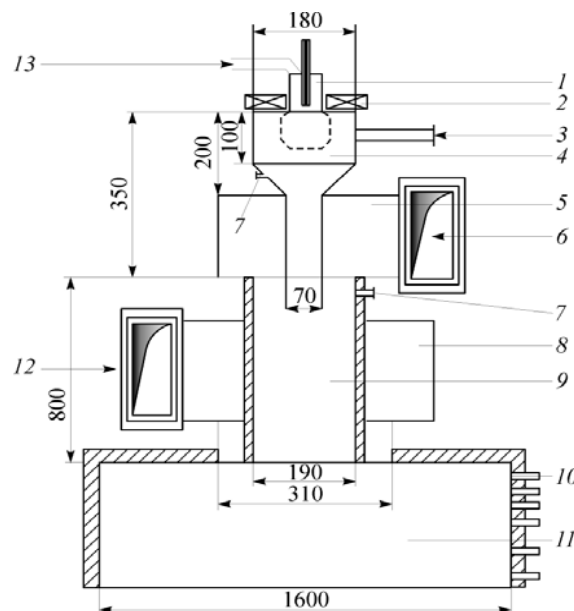
мүмкіндіктерін арттыру үшін осы процесті өте жақсы түсіндіретін физикалық модель негізіндегі математикалық модельдеу қажет. Көмірді плазмалық тұтату бойынша

және оны жоғары реакциялық екі қоспалы оттықпен біріктіріп жағу бойынша тәжірибелік мәндердің жоқтығы бұндай математикалық және физикалық модельдеулерді дайындауды қиындатады. Құрамында көміртегі бар материалдардың арасынан қатты отын түріне жататын көмірді жаңа технологияларды пайдаланып тиімділігін арттыру жұмыстары қолға алынуда. Құрамында көмірі бар шикізаттарға плазмалық технологияны пайдаланудың тиімділігі жоғары температураның пайдаланылу мүмкіндігімен [1], қажетті өнімді алудың термиялық түрлену дәрежесінің жоғарылығымен [2] сипатталады. [3] зерттеу жұмысында көмірдің тиімді пайдаланылуының жаңа тәсілдерін, есептеу және модельдеу жолдарын көруге болады. Көмір энергия алынатын маңызды және көп қолданыс тауып отырған негізгі көздерінің қатарында. Әлем бойынша электр энергиясының қырық пайыздан көп мөлшері көмірден алынады. Көмір пиролиздеу процестеріне, сұйылту процестеріне, күйдіру процесіне, газдандыру процесіне икемділігі жоғары әмбебап отын. Химия өнеркәсібінде көмірді шикізаттың қатарына жатқызады. Көмір қайталама өңдеуден өткенде металлургияда қалдықты көмір, химиялық өнеркәсіпте шикізатты көмір түрінде, электрлік энергиясында булы көмір түрінде аз кездесетін элементтерді шығаруда және графит өндірісінде кеңінен қолданылады. Осындай пайдаланылу мүмкіндіктеріне қарай мемлекетімізде көмірді қайта өңдеу әдістерінің, жану процестеріндегі бөлінетін зиянды қалдықтарды азайту жолдары [4] жұмыста көрсетілгендей кең ауқымда зерттелуде. Жоғары реакциялық екі қоспалы оттықпен біріктіріп жағу ЖЭТХД және жану процесінің негізгі шамалары полей температура өрісін, конденсирленген газ текті және қоспалы құраушылардың концентрациясын, жылдамдығын білуді талап етеді. ЖЭТХД процесінде және қазандық пешіндегі жану процестерімен қатар жүретін күрделі физикалық және химиялық процестерді терең, нақты талдау үшін сандық модельдеу әдісін пайдалану

тиімді және ыңғайлы тәсіл болып табылады. Осы жасалынған жұмыста алдымызға бір өлшемді Плазма-Көмір және үш өлшемді Cinar ICE компьютерлік бағдарламалары арқылы қазандықтағы жану процестерін модельдеу мүмкіндігін зерттеу мақсаты қойылды.

Тәжірибелік бөлім

Жанармайды электротермохимиялық дайындап, жану процестерінің физикалық механизмін түсініп, Cinar ICE бағдарламасының модельдеу мүмкіндігін тексеру үшін 1-суреттегі плазмалық отындық жүйемен жабдықталған, жылулық қуаты 3 МВт тәжірибелік пеште көмірдің жануына зерттеу жүргізілді.



1-плазмотрон, 2-электромагнитті катушка, 3 - аэроқоспа, 4 – ЖЭТХД камерасы, 5- аэроқоспа беретін құрылғы, 6-аэроқоспа, 7 температура өлшеп, газ үлгісін алатын ойымша, 8- екінші ретті ауамен қамту құрылғысы, 9- жағу құралының ортаңғы түтігі, 10 – газ үлгісін және қортқы көмір қалдығын алуға, температураны өлшеуге арналған ойымшалар, 11-пеш камерасы, 12- екінші ретті ауа, 13-плазмо тудырушы ауа

Сурет 1 – ЖЭТХД камераларын плазмотронмен және құйынды көміртозаңмен сәйкестендіру сызбасы

Қатты отынның пайдаланылу тиімділігін арттырып, қалдық мөлшері

мен ЖЭС жанармай балансындағы табиғи газды, зиянды газ тозаңды қалдықтардың бөліну мөлшерін төмендетуге бағытталған ЖЭТХД негізделген көмір тұтатудың плазмалық технологиясы құрастырылды (1 сурет). ЖЭТХД ЖЭС-те ПОЖ пайдалануымен жүзеге асады. ЖЭТХД технологиясы электр доғал плазманы плазматронда 1 аэроқоспамен (көміршаң + алғашқы ауа) 3 көмірдің ұшатын ұсақ бөлшектері пайда болғанға дейінгі және қорытқы көмір қалдығы аз-аздан газдандырыла бастайтын температураға дейін қыздыруға негізделген.

Бастапқы көмірден 6 негізгі аэроқоспамен араласқанда алғашқы ауада қышқылданатын және шығыс жердегі ауаның термохимиялық дайындалуын қамтитын қауіп-қатері жоғары, екі қоспалы отын (ыстық газ+қорытқы қалдық) алынады. Алынған отын екінші ретті ауа 12-мен араласқанда 11 қазандық пешінде қосымша отынды жақпастан өздігінен тұтанады. Тәжірибеде ылғалдылығы 1,3 пайыз, шығыстағы ұшатын ұсақ бөлшектері 14,7 пайыз, күлділігі 45,2 пайыз және жану жылуы 15 960 кДж/кг Екібастұздық тас көмірінің шаңы жандырылды. Көмірдің ұнтақ жұқалығы 12,5 пайыз. Яғни, бөлшектің орташа өлшемі 60 мкм.

Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау

1,15 м ұзындықты ПОЖ көлеміндегі ЖЭТХД есептеу плазматрон қуаты 36 кВт, аэроқоспаның бастапқы температурасы 300 °С, ПОЖ арқылы ауа мен көмір шығыны 600 және 410 кг/сағ шамаларында Плазма-Көмір бағдарламасымен жүргізілді. Есептеулерде ауадағы және газдағы көміртегі диоксидінің мөлшері ескерілмей, ауа 79 көлемдік пайызы азоттан, 21 көлемдік пайызы оттектен тұрады деп қолданылды.

Аэроқоспаның жану процесін алдын ала жануға плазмалық дайындауды теориялық зерттеуде жанармайдың плазма көзі орналасқан екі фазалы ағында термохимиялық алмасу кинетикасының механизмін бөлшектеп қарастыратын бір өлшемді Плазма-Көмір және пештің нақты геометриясы мен көмір бөлшектерінің жану процесінің

кинетикасын үш өлшемді жеңілдетілген кинетикалық сызба алуға мүмкіндік беретін Cinar ICE екі компьютерлік бағдарлама пайдаланылды. Плазма-Көмір көмегімен ПОЖ-да өтетін процестер сандық зерттелсе, Cinar ICE көмегімен қауіп-қатері жоғары екі қоспалы отынды қоса жаққандағы қазандық пешінің жұмыс процесі модельденді.

Плазма-Көмір бағдарламасының мүмкіндігі қолданыстағы ПОЖ және плазмалық газдандырыштардағы тәжірибелерде алынған тәжірибелік мәліметтерді пайдаланып тексерілді [5, 6]. Cinar ICE бағдарламасы дәстүрлі пештердегі процестерді үшөлшемді есептеулер арқылы тексерілді [7, 8]. Бірақ осы бағдарламаны пайдаланып ПОЖ бар пештерді есепте жүргізу үшін, оны жобалау үшін Cinar ICE бағдарламасы плазмалық белсендірілген көмірдің жану процестерін есептеуде қолданылуын зерттеп алу керек.

Cinar ICE бағдарламасының мүмкіндігін тексеру үшін тәжірибелік пештің дәстүрлі және жануды плазмалық белсендірген екі жұмыс істеу режимі таңдалып алынды. Жануды плазмалық белсендендіруге 36 кВт қуатпен жұмыс істейтін плазматрон алауын пайдалану арқылы қол жеткізілді. ПОЖ-да алынатын ЖЕО (жоғары реакциялы екіқоспалы оттық) шамалары Көмір-Плазма бағдарламасын қолданып есептелді. Олар Cinar ICE гидродинамиканың үшөлшемді бағдарламасын пайдаланумен орындалып, ПОЖ-бен қамтылған тәжірибелік пешті үш өлшемді есептеуге арналған бастапқы шамалар болды.

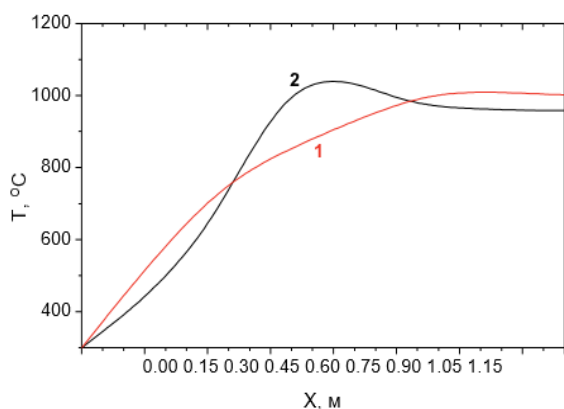
Сонымен қатар осы бағдарламамен қарапайым көміртозаңды құйынды оттықпен жабдықталған пештегі көмірдің жану реті есептелді. Есептеу нәтижесінде ЖЭТХД келесі сипаттамалары алынды: Температура таралуы (2-сурет), газ және бөлшектер жылдамдығы (3-сурет), газ фазасының қоспа концентрациясы (4-сурет), қорытқы көмір қалдығындағы көміртегінің концентрациясы және газдану дәрежесі (5-сурет).

2 - суретте газ және көмір бөлшектерінің температурасы ПОЖ ұзындығы бойымен жоғарылайтыны көрініп тұр. Бастапқы аумақта яғни мән 0 мен 0,35 метр арасында болғанда көмір бөлшектерін қыздыратын

газ фазасы бар плазмалық көздің жылу алмасуы шамадан тыс жоғарылайды. 0,35 пен 0,8 м арасындағы аумақта көміртегінің қышқылдануы салдарынан және көмір бөлшектерінің бетіндегі жылу бөлінуіне сәйкес олардың температурасы 1121 °С дейін өсіп, газдарда болатын температурадан 264 градусқа асып кетеді. Бұл құбылыстың нәтижесінде осы аумақтағы температура қисығының инверсиясы байқалады. 0,9 метр газ температурасы 1015°С максимум мәнге жетіп, ПОЖ шығысында аздап 1002 °С дейін төмендейді.

Бұл жағдайда газ температурасы бөлшектер температурасын 41 градусқа жоғарылатады. Ол бөлшектердің ПОЖ қабырғасынан сәулеленудің жылу берілуіне байланысты орындалатын құбылыс.

ПОЖ кірісіндегі газ және бөлшек жылдамдықтары (3-сурет) бірдей бола тұра ұзындыққа байланысты өседі дежүйенің шығысында максимум мәндерге жетіп, сәйкесінше 33,8 және 33,2 м/с жылдамдыққа ие болады. Газ жылдамдығы ПОЖ барлық ұзындығы бойымен бөлшек жылдамдығынан артығырақ болады. ПОЖ шығысындағы ағын жалдамдығы дәстүрлі шаңкөмірлі оттықтың шығысындағы аэроқоспа жылдамдығынан айтарлықтай артық болатынын атап өткен жөн.

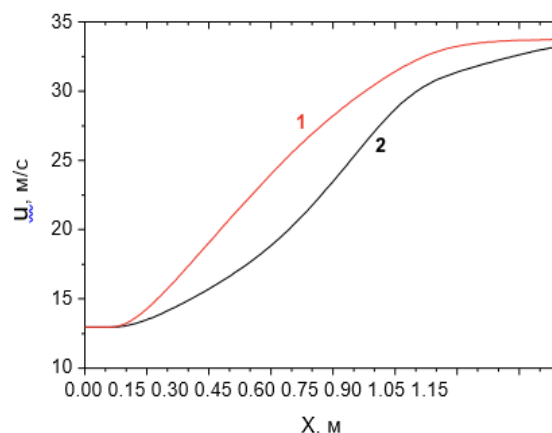


1 – газ, 2 – бөлшектер

Сурет 2 – ПОЖ бойынша ЖЕО температурасының өзгеруі

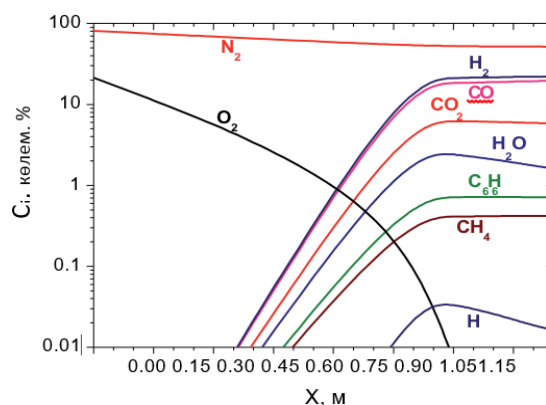
4 және 5 суреттерден көмір бөлшектерін қыздырғанда қортқы көмір қалдығының газданумен қатар біруақытта көмірдің ұшатын ұсақ бөлшектерінің бөлінуі байқалады). Жүйенің шығысында жанғыш қоспалардың H₂, CH₄, CO, C₆H₆, H

концентрациялары ПОЖ ұзындығы бойымен өсе отырып, 41,8 пайызды құрап өз максимумына жетеді.

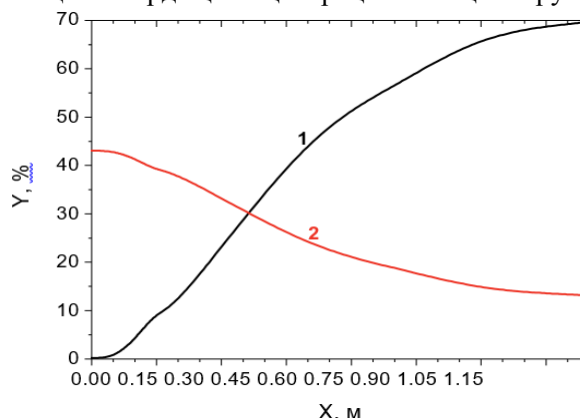


1 – газ, 2 – бөлшектер

Сурет 3 – ПОЖ ұзындығы бойынша ЖЕО жылдамдығының өзгеруі



Сурет 4 - ПОЖ ұзындығы бойымен газтекес қоспалардың концентрациясының өзгеруі



Сурет 5 – газдандыру деңгейінің (1) және ПОЖ ұзындығы бойынша қорытқы көмір қалдығындағы (2) көміртегі концентрациясы

ПОЖ шығысындағы CO₂, H₂O, O₂ тотықтырғыштар концентрацияларының қосындысы 7,3 пайыздан аспайды. ПОЖ ұзындығы бойымен азот концентрациясы N₂ 79 пайыздан 50,8 пайызға төмендейді.

Қортқы көмір қалдығындағы көміртегі концентрациясы төмендейді де, көміртегі газдандыру деңгейі ПОЖ ұзындығы бойымен өсіп, шығыста 69,5 пайызды құрап пеш аумағында екінші ретті ауамен араласқанда қарқынды тұтанатын жоғары реакциялы екі қоспалы отын алуға мүмкіндік береді. Қортқы көмір қалдығының жану жылуы 7200 кДж/кг болады.

1 кестедегі ПОЖ шығысындағы алынған ЖЭТХД процесінің интегралдық сипаттамалары ЖЭТХД өнімдерінің жануын тәжірибелік пеште Cinar ICE бағдарламасын қолданып сандық модельдегенде бастапқы мәліметтер ретінде пайдаланылды. Тәжірибелік пешті үшөлшемді есептеуде пайдаланылған қосымша бастапқы мәліметтер 2 кестеде келтірілді.

Кесте 1 - ПОЖ шығысындағы ЖЭТХД өнімдерінің сипаттамалары [9]

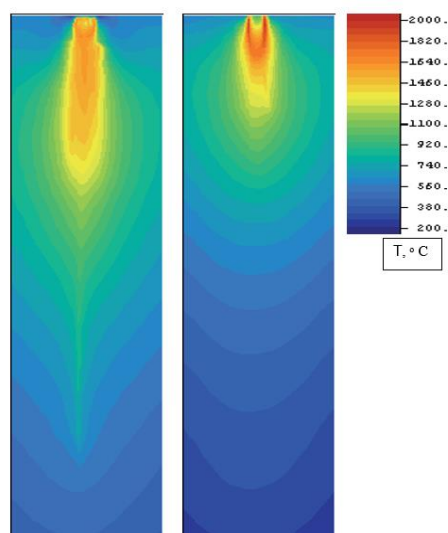
Газ фазасы құрамы, көлем %, кг/сағ						
H ₂	CO	CH ₄	C ₆ H ₆	CO ₂	H ₂ O	N ₂
21,6	19,2	0,4	0,7	5,8	1,6	50,8
14,0	174,2	2,2	18,0	82,2	9,1	462,0
Газ температурасы, °C			Бөлшек температурасы, °C			
1002			961			
Күл, кг/сағ			185,3			
C, кг/сағ			68,4			
Ағын жылдамдығы, м/с			33,8			

Оттықты Cinar ICE бағдарламасымен есептеу нәтижелері 6-8 суреттерде көрсетілген. 6 А, Б суретінде екі режимдегі температура өрістері көрнекі түрде көрсетілген. А суретінде оттықта көмірді дәстүрлі жағу, Б суретте аэро қоспаны алдын ала плазмалық белсендендіргендегі температура өрістері келтірілген. Көмірді дәстүрлі түрде жаққанда 1580°C максималды температуралы симметриялық алаудың температурасы.

1600°C шамасындағы жалпы ядросын тудырады. ПОЖ әсері жоғарыреакциялы, екіқоспалы отын алауының формасының өзгеруінен, алаудың ұзындығының азаюымен және температураның 2015°C дейін өзгеруінен байқалады.

Кесте 2 - пешті үшөлшемді есептеуге арналған бастапқы мәліметтер [10]

Сипаттама	Дәстүрлі жағдай	ПОЖ жағдайы
Көмір шығыны, кг/сағ	410	410
Бірінші ретті ауа шығыны, кг/сағ	600	600
Пештегі ауаныңекінші ретті шығыны, кг/сағ	2322	2322
Бірінші ретті ауа температурасы, °C	300	300
Екінші ретті ауа температурасы, °C	300	300
ПОЖ-дан кейінгі қортқы қалдық шығыны, кг/сағ	-	253,7
ЖЭТХД газтекті өнімдердің шығыны, кг/сағ	-	761,6
Көмір тығыздығы, кг/м ³	1200	1200
Есептеуші тор өлшемі	56X56X60	56X56X60



А – көмірдің дәстүрлі түрде жану режимі,
Б – ПОЖ-бен белсендендірілген көмірді жағу режимі

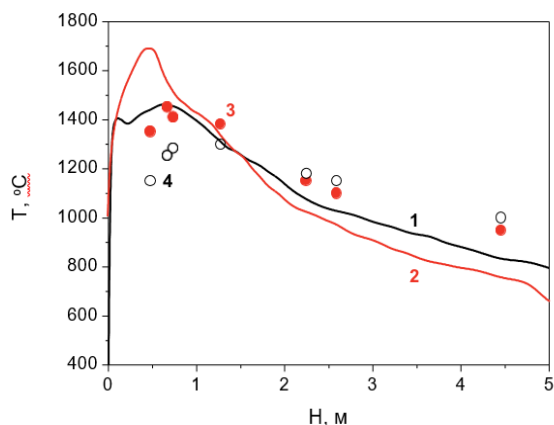
Сурет 6 – Пештің бойлық орталық қимасының температура өрісі

Бұл ерте тұтанумен және бастапқы көмірмен салыстырғанда жоғары реакциялық сипатқа болатын жоғары температуралы ЖЭТХД (1 кесте) өнімінің толық жанумен байланысты деп түсіндіруге болады.

Есептік және тәжірибелік мәліметтерді салыстыру

7 суреттен көрініп тұрғандай тәжірибелік және есептік температуралық байланыс сапалы түрде ұқсас және оттық 0,5 метр ара қашықтықта орналасқан аумақта

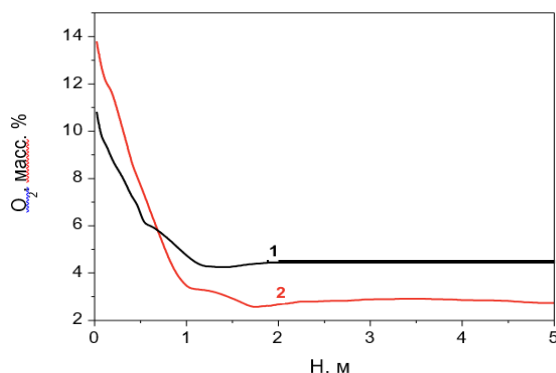
айтарлықтай максимумға жетеді. Дәстүрлі түрдегі жануда пештегі максималды температура деңгейі 0,13 метр ара қашықтықта белендендірілген ПОЖ оттығынан жоғары. Температура айырмасы 0,025 және 0,13 метр аралығында 164 градусқа жетеді. Ол ПОЖ пайдалану режимімен салыстырғанда дәстүрлі жағу кезінде жоғары концентрацияға және қосынды бетке ие көмір бөлшектерінің сәулелену белсенділігімен сипатталады. Соңғы жағдайда ПОЖ дан оттық кеңістікке ыстық газ бен массасы бастапқы көмір шығынының 30 пайызынан аспайтын қортқы көмір қалдығынан тұратын екі қоспалы отын түседі. Бұл сәулелендіруші бөлшектердің қосынды бетінің үш мәрте төмендеуіне әкеледі. 0,13 метрден 0,6 метрге дейінгі аумақта плазмалық белсендендіру және дәстүрлі режимінде де температура деңгейі жоғары. 0,4 метрде ең жоғары айырмашылық байқалады және 260 градус болады. Тәжірибеде белсендендірілген оттықтың жану температурасының ең жоғарғы мәні дәстүрлі түрде жағумен салыстырғанда 200 градусқа жоғары.



1 – көмірді дәстүрлі жағу, 2 – көмірді пеште ПОЖ-бен жағу, 3, 4 – пеште көмірді ПОЖ бен және ПОЖ-сыз жағудың тәжірибелік мәндері

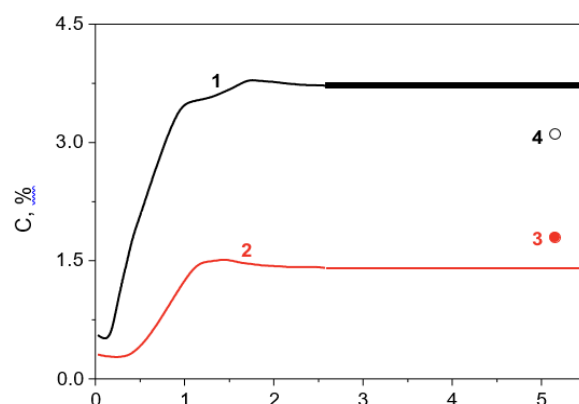
Сурет 7 – Пештің биіктігі бойымен жану өнімдерінің жоғары температураларының таралуы

Бірақ, температураның максимумы ағыс бойымен кішкене төменге ығыстырылған және пештің 0,67 метр биіктігінде байқалады. Отынды плазмалық белсендендіру кезіндегі алау температурасының жоғарылығы оның 0,67 метр аумағында оттегі концентрациясының бірден төмендеуімен дәлелденетін толығырақ жанумен түсіндіріледі (8 сурет).



1 – көмірді дәстүрлі жағу, 2 – көмірді ПОЖ-бен жағу

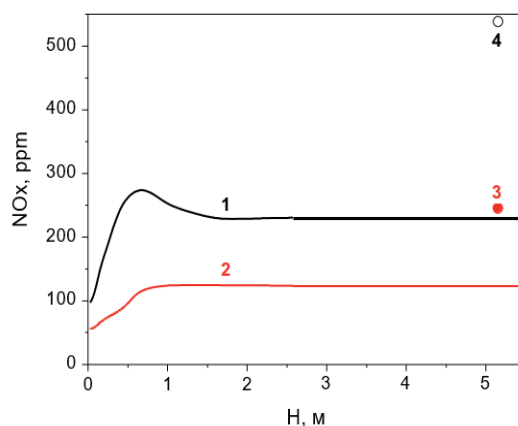
Сурет 8 – Оттегінің пеш биіктігі бойымен орта массалық таралу концентрациясы



1 – көмірді дәстүрлі жағу, 2 – көмірді пеште ПОЖ-бен жағу, 3, 4 – пеште көмірді ПОЖ бен және ПОЖ-сыз жағудың тәжірибелік мәндері

Сурет 9 – Пештің биіктігі бойымен жану өнімдерінде оттегі концентрация мәнінің орта мәндерінің таралуы

Отынның механикалық жанбауын, көмірдің жану толықтығын сипаттайтын жанбай қалған көміртегінің концентрациясы пеш шығысында ($H = 7,5$ м) ПОЖ қолданғандағы дәстүрлі жағумен салыстырғанда төрт есеге төмен (9 сурет).



1 – көмірді дәстүрлі жағу, 2 – көмірді пеште ПОЖ-бен жағу, 3, 4 – пеште көмірді ПОЖ бен және ПОЖ-сыз жағудың тәжірибелік мәндері

Сурет 10- Орта массалы концентрациясының пеш бойымен таралуы

Сонымен қатар, ПОЖ қатты отынның жану процесінің экологиялық сипаттамаларын жақсартатынын азот оксиді түріндегі қалдықтардың екі есеге төмендететінін 10 суреттен көре аламыз.

Осылайша, үш өлшемді есептеу бағдарламасы Cinar ICE тексеру үшін тәжірибелік пешті нақты зерттеу мәндері пайдаланылды [11, 12]. 7 суреттен пештің бастапқы аумағындағы температура қисығында инверсияның бар болуынан және сипаттаушы температуралық максимумдардан көрінетін есептік және тәжірибелік мәндердің сапалық сәйкестігін көрсетеді. Тәжірибеде де, есептеулерде де тәжірибелік пеш шығысындағы жану өнімдерінің температурасы дәстүрлі жану

Қорытынды

Жұмыс нәтижесінде қазандықтың дәстүрлі жану режиміндегі көмірдің жану процестеріне және көмір жануын плазмалық белсендендіру жұмыстарына зерттеу жүргізілді. Жағуды плазмалық белсендендіру алаудың жылутехникалық сипаттамаларына әсер етіп, отынның механикалық жанбауының төмендетіп, пеш шығысындағы азот оксидінің концентрациясын азайтатыны анықталды.

Оттық кеңістігінде көмірді дәстүрлі жағуды жағу процесін плазмалық белсендендіру кезінде жүргізілген салыстырмалы сандық зерттеулер көмірдің жану процесінің сипаттаушы негізгі шамалар бойынша (температуралар, жанбаған көміртегі концентрациясы, жану өнімдеріндегі оттегі және азот оксиді) тәжірибелік және есептік мәндердің сапалық және сандық көрсеткіштер бойынша қанағаттанарлықтай сәйкестік деңгейін көрсетті. Жылулық қуаты 3 МВт тәжірибелік пештегі көмірдің ПОЖ арқылы және ПОЖ-сыз жануын Cinar ICE бағдарламасын тексеру бұл бағдарламалық жиынның ПОЖ арқылы

режимінде ПОЖ пайдаланылған жағдайдан жоғары екені байқалды. Жану өнімінің тәжірибелік және есептік температура мәндерінің пештің толық биіктігі бойынша айырмашылығы 20 пайыздан аспайды. Бұл айырмашылық Cinar ICE бағдарламасында жеңілдетілген кинетикалық сызба fast chemistry-дің қолданылуымен сипатталады. Қортқы қалдықтағы жанбаған көміртегі концентрациясы тәжірибелік пештің шығысында өлшенді (9 сурет).

Тәжірибелік пештің шығысындағы азот оксидінің концентрациясы (10 сурет) тәжірибеде және есептеуде көмірді дәстүрлі жағуға қарағанда плазмалық белсендендірілгенде төмен болды. Азот оксиді концентрациясы мәнінің тәжірибе мен есептеуде айтарлықтай айырмашылығының болуы (52-54%) Cinar ICE бағдарламасымен құрылған кинетикалық сызба нақтылауды талап ететіні көрінеді.

өнеркәсіптік қазандықтардың есептеу мақсатында ПОЖ құрылымдық сызбасын алуға, ПОЖ жобалау үшін сенімді бастапқы мәліметтерді алуға пайдаланылуының мүмкіндігін дәлелдейді.

Конфликт

Барлық авторлардың атынан корреспондент автор мүдделер қайшылығы (конфликт) жоқ деп мәлімдейді.

Алғыс

Зерттеуге көмек берген әріптестерге, Авторлар әріптестері профессорлар Е.И. Карпенкоға, Б.Г. Трусовқа, Ф. Локвудқа, З. А. Мансуровқа, М. Гороховскиге, А.С. Аскарловаға, А.П. Бурдуковқа, З. Янкоскиге, ғылым кандидаттары және философия докторлары А. Б. Устименкоға, О. А. Лаврищевке, Ю.Е. Карпенкоға, К.А. Умбеткалиевке, А.О. Нагибинге, инженерлер В.Г. Лукьященкоға, С.С. Тютеебаевке, С.В. Лобыцинге, В.Н. Шевченкоға, И. Г. Степановке зерттеу жүргізудегі көмектері үшін, нәтижелерді талқылағандары үшін алғыс айтады.

Verification of three-dimensional mathematical modeling when calculating the combustion of hydrocarbon fuel in an experimental cylindrical furnace enriched with a plasma fuel system

²Messerle V.E., ¹Bolegenova S.A., ¹Bodykbaeva M.K.,
¹Kuykabayeva A.A., ¹Slavinskaya N., ¹Tastanbekov A.K

¹KazNU named after al-Farabi, Department of Thermophysics and Technical Physics, Almaty, KR

² SRI of experimental and theoretical physics KazNU named after al-Farabi

³German atomic Energy Agency, Muchen city, Germany

* Corresponding author email: moldirbodykbaeva@gmail.com

ABSTRACT

In this work, the operation of the boiler in traditional and plasma-activated conditions is investigated. To test the possibility of modeling the Cinar ICE program with an understanding of the physical mechanism of the processes of electrothermochemical fuel preparation (ETCF) and combustion, a study of coal combustion in an experimental furnace with a thermal power of 3 MW equipped with a plasma fuel system was carried out. To study the combustion process of an air mixture that had undergone preliminary plasma preparation for combustion, one-dimensional plasma-coal and three-dimensional computer programs Cinar ICE were used, which study in detail the mechanism of the kinetics of thermochemical exchange in a two-phase flow, where the plasma fuel source is located, and the exact geometry of the furnace, and the kinetics of the process combustion of coal particles. As a result of calculations, the distribution of temperature, velocity of gas and particles in the process of ETCPT, the concentration of gas-phase mixtures, the concentration of carbon and the degree of gas contamination in the remainder of alloyed coal were determined. It was found that the plasma activation of combustion affects the thermal characteristics of the Torch, the mechanical non-combustible fuel residue and the concentration of nitrogen oxide at the outlet from the furnace. It has been proven that when simulating coal combustion, it is possible to achieve an effective description of the process using the Cinar ICE program.

Keywords: Plasma activation, burner, combustion simulation, fuel system, carbon.

Received: 22 November 2020
Peer-reviewed: 29 November 2020
Accepted: 14 December 2020

	Information about authors:
Messerle Vladimir Efremovich	<i>d.t.n. professor, SRI of experimental and theoretical physics KazNU named after al-Farabi. Almaty, Kazakhstan. ORCID ID: 0000-0003-4281-1429. Email: ust@physic.kz</i>
Bolegenova Saltanat Alikhanovna	<i>d.f.-m.n. professor, Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, Department of Thermophysics and Technical Physics. Almaty, Kazakhstan. ORCID ID: 0000-0001-5001-7773. Email: Saltanat.Bolegenova@kaznu.kz</i>
Bodykbaeva Moldir Kabdenovna	<i>doctoral student, Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, Department of Thermophysics and Technical Physics. Almaty, Kazakhstan. ORCID ID: 0000-0002-1181-9797. Email: moldirbodykbaeva@gmail.com</i>
Kuykabayeva Aizhan Amangaliyevna	<i>PhD, Senior teacher, Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, Department of Thermophysics and Technical Physics. Almaty, Kazakhstan. ORCID ID: 0000-0002-0905-4422. Email: a.kuikabaeva@gmail.com</i>
Slavinskaya Nadezda	<i>PhD professor, German atomic Energy Agency, Muchen city, Germany. ORCID ID: 0000-0001-8682-2192. Email: Nadja.slavinskaya@dlr.de</i>
Tastanbekov Abzal Kairatovich –	<i>doctoral student, al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, Department of Thermophysics and Technical Physics. Almaty, Kazakhstan. ORCID ID: 0000-0002-8595-1395. Email: tastanbekov91@mail.ru</i>

Проверка трехмерного математического моделирования при расчете горения углеводородного топлива в экспериментальной цилиндрической печи, обогащенной системой плазменного топлива

²Мессерле В. Е., ¹Болегенова С. А., ^{*1}Бодыкбаева М.К., ¹Куйкабаева А. А.,
³Славинская Н., ¹Тастанбеков А. К.

¹ КазНУ им. аль-Фараби, кафедра теплофизики и технической физики, Алматы, КР

² НИИ экспериментальной и теоретической физики (НИИ ЭТФ) КазНУ им. аль-Фараби

³Немецкое Агентство по Атомной энергетике, Германия.

* Электронная почта автора: e-mail: moldirbodykbaeva@gmail.com

АННОТАЦИЯ

В данной работе исследовано функционирование котла в традиционных и плазменно-активированных условиях. Для проверки возможности моделирования программы Cinar ICE с пониманием физического механизма процессов электротермохимической подготовки топлива (ЭТХПТ) и горения проведено исследование горения угля в экспериментальной печи тепловой мощностью 3 МВт, оснащенной плазменной

Статья поступила: 22 ноября 2020
 Рецензирование: 29 ноября 2020
 Принята в печать: 14 декабря 2020

топливной системой (по). Для изучения процесса горения аэросмеси, прошедшей предварительную плазменную подготовку к сжиганию, были использованы одномерные плазменно-угольные и трехмерные компьютерные программы CInag ICE, детально изучающие механизм кинетики термохимического обмена в двухфазном потоке, где находится плазменный источник топлива, и точную геометрию печи, и кинетику процесса горения угольных частиц. В результате расчетов были определены распределение температуры, скорости газа и частиц в процессе ЭТХПТ, концентрация газофазных смесей, концентрация углерода и степень загазованности в остатке легированного угля. Установлено, что плазменная активация горения влияет на теплотехнические характеристики Факела, механический несгораемый остаток топлива и концентрацию оксида азота на выходе из печи. Доказано, что при моделировании горения угля можно добиться эффективного описания процесса с помощью программы CInag ICE.

Ключевые слова: Плазменная активация, горелка, моделирование процесса горения, топливная система, углерод.

	Информация об авторах:
Мессерле Владимир Ефремович	д.т.н., профессор, НИИ экспериментальной и теоретической физики (НИИ ЭТФ) КазНУ им. аль-Фараби. Алматы, Казакстан. ORCID ID: 0000-0003-4281-1429. Email: ust@physic.kz
Болегенова Салтанат Алихановна	д.ф.-м.н., профессор, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, физико-технический факультет, кафедра теплофизики и технической физики. Алматы, Казакстан. ORCID ID: 0000-0001-5001-7773. Email: Saltanat.Bolegenova@kaznu.kz
Бодыкбаева Молдир Кабденовна	Магистр, докторант, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, физико-технический факультет, кафедра теплофизики и технической физики. Алматы, Казакстан. ORCID ID: 0000-0002-1181-9797. Email: moldirbodykbaeva@gmail.com
Куйкабаева Айжан Амангалиевна	PhD, старший преподаватель, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, физико-технический факультет, кафедра теплофизики и технической физики. Алматы, Казакстан. ORCID ID: 0000-0002-0905-4422. Email: a.kuikabaeva@gmail.com
Славинская Надежда	PhD, профессор, Немецкое Агентство по Атомной энергетике, Германия. ORCID ID: 0000-0001-8682-2192. Email: Nadja.slavinskaya@dlr.de
Тастанбеков Абзал Кайратович	Магистр, докторант, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, факультет физико-технический, кафедра теплофизики и технической физики. Алматы, Казакстан. ORCID ID: 0000-0002-8595-1395. Email: tastanbekov91@mail.ru

Осы мақалаға сілтеме: Мессерле В. Е., Болегенова С. А., Бодыкбаева М.К., Куйкабаева А. А., Славинская Н., Тастанбеков А. К. Плазмалық отын жүйесімен байытылған тәжірибелік цилиндр пеште көмірсутекті отынның жануын есептеу кезінде үш өлшемді математикалық модельдеуді тексеру // *Комплексное использование минерального сырья = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* -2020. №4(315), б. 96-105. <https://doi.org/10.31643/2020/6445.41>

Cite this article as: Messerle V. E., Bolegenova S. A., Bodykbaeva M. K., Kuikabayeva A. A., Slavinskaya N., Tastanbekov A. K. Plazmalıq otın jüyesimen bayıtılğan tәjiribelik cılındr peşte kömirswtekti otınıñ janwın esep tew kezinde üş öleşmді matematikalıq model dewd i tekserw [Verification of three-dimensional mathematical modeling when calculating the combustion of hydrocarbon fuel in an experimental cylindrical furnace enriched with a plasma fuel system]. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* - 2020. №43 (315), pp. 96-105. (In Kazakh.). <https://doi.org/10.31643/2020/6445.41>

Әдебиеттер

- [1] Steinberg M. Conversion of fossil and biomass fuels to electric power and transportation fuels by high efficiency integrated plasma fuel cell energy cycle. // *International Journal of Hydrogen Energy.* – 2005. V. 31. N.3. – P. 405-411. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.08.007>
- [2] Oso A., Williams O., Oluwatosin G. A., Growth O. Performance, nutrient digestibility, metabolizable energy, and intestinal morphology of growing turkeys fed diet supplemented with arginine. // *Livestock Science.* - 2017. V. 198. N.6. - P. 24-30. <http://doi.org/10.1016/j.livsci.2017.01.018>
- [3] Messerle E., Ustimenko V. Plasma-Aided Coal Ignition and Combustion. // *Modeling and Full-Scale Trials. IEEE Transactions On Plasma Science.* – 2014. V. 42. N.12. P. 3716-3721. <http://doi.org/10.1109/TPS.2014.2345871>
- [4] Аскарова А.С., Болегенова С.А., Бекетаева М.Т. Формирование вредных пылегазовых компонентов в процессе горения. // *Известия НАН РК. Серия физико-математическая.* – 2015. – №1(299). – С. 32-38.
- [5] Сакипов З.Б., Мессерле В.Е., Ибраев Ш.Ш. Электротермохимическая подготовка углей к сжиганию. - Алматы: Гылым (Наука), 1993. - 259 с.
- [6] Kalinenko, R. A., Kuznetsov, A. P., Levitsky, A. A., Messerle, V. E., Mirokhin, Y. A., Polak, L. S., ... Ustimenko, A. B. (1993). Pulverized coal plasma gasification. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 13(1), 141–167. <https://doi.org/10.1007/bf01447176>
- [7] Abbas T., Costen P. G. Lockwood F. C. *Solid Fuel Utilisation: From Coal to Biomass.* - Combustion Institute: Pittsburgh, 1996. – 304 p.
- [8] Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Аскарова А.С., Нагибин А.О. Горение пылеугольного факела в топке с плазменно-топливной системой. // *Теплофизика и аэромеханика.* -2010. -Т. 17. N3. -С.467-476.
- [9] Мессерле В.Е., Устименко А.Б. Радиационно-плазменная технология переработки угля. // *Вестник КазНУ. Серия химическая.* - 2012. - N4 (68). – С. 107-113.

- [10] Мессерле В.Е., Устименко А.Б. Плазмохимические технологии переработки топлив. // Известия вузов. Химия и химическая технология. - 2012. - Т. 55. Вып. 4. - С. 30-34.
- [11] Бакихин А. В. О состоянии и перспективах развития методов переработки отработавшего ядерного топлива. Обзор // *Комплексное использование минерального сырья = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu. № 1. 2018. Стр. 71-87. <https://doi.org/10.31643/2018/166445>*
- [1] Gorokhovskii M., Karpenko E.I., Lockwood F.C., Messerle V.E., Trusov B.G. Ustimenko A.B. Plasma Technologies for Solid Fuels. // *Experiment and Theory. Journal of the Energy Institute.* – 2005. – V 78. N 4. – P. 57-171

Reference

- [1] Steinberg M. Conversion of fossil and biomass fuels to electric power and transportation fuels by high efficiency integrated plasma fuel cell energy cycle. *International Journal of Hydrogen Energy.* 2005. 31. 3. 405-411. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.08.007> (in Eng.)
- [2] Oso A., Williams O., Oluwatosin G. A., Growth O. Performance, nutrient digestibility, metabolizable energy, and intestinal morphology of growing turkeys fed diet supplemented with arginine. *Livestock Science.* 2017. 198. 6. 24-30. <http://doi.org/10.1016/j.livsci.2017.01.018> (in Eng.)
- [3] Messerle E., Ustimenko B. Plasma-Aided Coal Ignition and Combustion. Modeling and Full-Scale Trials. *IEEE Transactions On Plasma Science.* 2014. 42. 12. 3716-3721. <http://doi.org/10.1109/TPS.2014.2345871> (in Eng.)
- [4] Askarova A. S., Bolegenova S.A., Beketayeva M.T. Formirovaniye vrednykh pylegazovykh komponentov v protsesse goreniiya [Formation of harmful dust and gas components in the combustion process]. *Izvestiya NAN RK = Seriya fiziko-matematicheskaya.* 2015. 1(299). 32-38 (in Russ.).
- [5] Sakipov Z. B., Messerle V. E., Ibrayev Sh.Sh. Elektrotermokhimicheskaya podgotovka ugley k szhiganiyu [Electrochemical preparation of coals for combustion]. *Almaty: Gylym (Nauka).* 1993, 259 (in Russ.).
- [6] Kalinenko, R. A., Kuznetsov, A. P., Levitsky, A. A., Messerle, V. E., Mirokhin, Y. A., Polak, L. S., ... Ustimenko, A. B. (1993). Pulverized coal plasma gasification. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 13(1), 141–167. <https://doi.org/10.1007/bf01447176> (in Eng.)
- [7] Abbas T. Costen P. G. Lockwood F. C. *Solid Fuel Utilisation: From Coal to Biomass.* Pittsburgh: Combustion Institute. 1996, 304 (in Eng.)
- [8] Messerle V. E., Ustimenko A.B., Askarova A. S., Nagibin A. O. Goreniiye pyleugolnogo fakela v topke s plazmenno-toplivnoy sistemoy [Combustion of a pulverized coal torch in a furnace with a plasma-fuel system]. *Teplofizika i aeromekhanika.* 2010. 17. 3, 467-476 (in Russ.).
- [9] Messerle V. E., Ustimenko A. B. Radiatsionno-plazmennaya tekhnologiya pererabotki uglya [Radiation-plasma technology of coal processing]. *Vestnik KazNU = Seriya khimicheskaya.* 2012. 4 (68), 107-113 (in Russ.).
- [10] Messerle V.E., Ustimenko A.B. Plazmokhimicheskiye tekhnologii pererabotki topliv [Plasma-chemical technologies for fuel processing]. *Izvestiya vuzov = Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya.* 2012. 55. 4, 30-34 (in Russ.).
- [11] Balikhin A. V. O sostoyanii i perspektivakh razvitiya metodov pererabotki otrabotavshogo yadernogo topliva. Obzor [On the state and prospects of development of methods for processing spent nuclear fuel. Review] // *Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* No. 1. 2018. p. 71-87. <https://doi.org/10.31643/2018/166445> (In Russ.)
- [12] Gorokhovskii M., Karpenko E.I., Lockwood F.C., Messerle V.E., Trusov B.G. Ustimenko A.B. Plasma Technologies for Solid Fuels. *Experiment and Theory. Journal of the Energy Institute.* 2005. 78. 4, 57-171 (in Eng.)