

https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_2_7

XFTAP 44.31.29

ПЛАЗМАЛЫҚ ОТЫНДЫ АКТИВТЕНДІРУ ЖАҒДАЙЫНДА ҚАРАЖЫРА КЕН ОРЫН КӨМІРІНІҢ ТҮТАНУЫ МЕН КЕЙІНГІ ЖАНУЫНЫҢ ТЕРМОХИМИЯЛЫҚ ҮДЕРІСІН ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ УГЛЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАРАЖЫРА В УСЛОВИЯХ ПЛАЗМЕННОЙ АКТИВАЦИИ ТОПЛИВА

EXPERIMENTAL STUDY OF THE THERMOCHEMICAL PROCESS OF IGNITION AND SUBSEQUENT COMBUSTION OF COAL FROM THE KARAZHYRA DEPOSIT UNDER CONDITIONS OF PLASMA FUEL ACTIVATION

М.С. Канапинов ^{1*}, Е.Б. Бутаков ², Г.С. Дуйсембаева ¹, Л.Н. Измаилов ¹,
А.С. Қизатов ¹, Е.Д. Даулетханов ¹

¹КЕАҚ «Дәулет Серікбаев атындағы ШҚТУ», Өскемен қ., Қазақстан

²РФА СБ В.Е. Кутателадзе атындағы Жылуфизика институты, Новосібір қ., Ресей

*Жауапты автор: Канапинов Медет Серикович, e-mail: mega_bum_90@mail.ru

Түйінді сөздер:

Плазмалық тұтандыру
жүйесі, жағу, жану,
плазматрон, тұтандыру,
зерттеу, тас көмір.

ТҮЙІНДЕМЕ

Ғылыми-зерттеу мақаласында бу қазандықтарында тұтатудың дәстүрлі мазуттық әдісін көмір тозаңынан плазмалық активтеу арқылы тұтандырумен алмастыруға негізделген баламалы технологияның болашағы зор нұсқасын эксперименттік зерттеу нәтижелері келтірілген. Эксперименттер В.Е. Кутателадзе атындағы СО РФА Жылуфизика институтында «Қаражыра» кен орнынан алынған тас көмірді жағуға арналған зертханалық қондырғыда іске асырылады. Қондырғыны суық күйден тұтандыру бойынша жүргізілген тәжірибелер сериясы көрсеткендей, плазмалық тұтандыру жүйесін (ПСВ) R-90 мкм дисперстілік сипаттамасына ие көмір шаңын ауа ағысымен бірге 6-18 м/с жылдамдықта беру арқылы қолдану шамамен 1000 °С температурасы бар факелдің өзекті қалыптастыруға мүмкіндік береді. Бұл кезде ауаның артықтық коэффициенті 0,7 – 0,5 аралығында болып, ал тұтандыру уақыты шамамен 200 с құрайды. Сонымен бірге, көмір тозаңының шығынын арттыру тұтандыру камерасындағы температураның жоғарылауына алып келетіндігі, соның нәтижесінде жану процессін қарқындатуға және оттық кеңістігінің жедел қызуына ықпал етеді.



© 2026 М.С. Канапинов, Е.Б. Бутаков, Г.С. Дуйсембаева, Л.Н. Измаилов,
А.С. Қизатов, Е.Д. Даулетханов
Бұл жұмыс Creative Commons Attribution 4.0 халықаралық лицензиясы
(CC BY 4.0) бойынша таратылады.
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Ключевые слова:

Плазменная система
воспламенения,
сжигание, горение,
плазматрон, розжиг,
исследование, каменный
уголь

АННОТАЦИЯ

В научной исследовательской статье представлены результаты экспериментального исследования одного из перспективных вариантов альтернативной технологии розжига паровых котлов, основанной на замене традиционного мазутного розжига плазменной активацией воспламенения угольной пыли. Эксперименты выполнены в Институте теплофизики им. В.Е. Кутателадзе СО РАН на лабораторной установке при сжигании каменного угля месторождения «Каражыра». Серия опытов по розжигу из холодного состояния показала, что применение плазменной системы воспламенения (ПСВ) при подаче угольной пыли с размером R-90 мкм совместно с воздухом со скоростями 6 –18 м/с обеспечивает формирование факельного ядра с температурой порядка 1000 °С при коэффициенте избытка воздуха 0,7 – 0,5 и времени розжига около 200 с. Дополнительно установлено, что увеличение расхода угольной пыли приводит к росту температуры в камере дожигания, способствуя интенсификации процесса горения и ускоренному прогреву топочного объема.

keywords:

Plasma ignition system,
combustion, burning,
palsmatron, ignition,
research, coal.

ABSTRACT

The results of an experimental study of one of the promising options for alternative steam boiler ignition technology, based on replacing traditional fuel oil ignition with plasma activation of coal dust ignition, are presented. The experiments were carried out at the V.E. Kuatladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, on a laboratory setup using coal from the Karazhyra deposit. A series of experiments on cold ignition showed that the use of a plasma ignition system (PSI) when supplying coal dust with R-90 mkm characteristics together with air at speeds of 6-18 m/s ensures the formation of a torch core use a temperature of about 1000°C at on air excess coefficient of 0.7 – 0.5 and an ignition time of about 200 s. In addition, it has been established that an increase in coal dust consumption leads to an increase in temperature in the afterburner chamber, contributing to the intensification of the combustion process and accelerated heating of the furnace volume.

КІРІСПЕ

Әлем бойынша электр энергиясын өндіру балансында баламалы энергетика үлесінің артуына қарамастан, жылу электр станциялары (ЖЭС) әлі де өндірістің негізгі бөлігін қамтамасыз етеді (P. Fragkos, et al, 2023). Бұл, ең алдымен, қатты отынның негізінен көмірдің, сондай-ақ оның басқа энергетикалық ресурстарға қатысты салыстырмалы түрде төмен құнының айтарлықтай барланған қорларымен түсіндіріледі (T. Nakamura et al, 2024).

Алайда көмірді негізгі энергетикалық ресурс ретінде пайдалану бірқатар жағымсыз факторларға әкеледі (B.Gajdzil et al, 2024). Экологиялық тұрғыдан алғанда көмірді өндіру ластаушы заттар мен парниктік газдардың айтарлықтай шығарындыларына әкеледі (Coal Standards and Gas Standards, 2024). Технологиялық тұрғыдан қарастыратын болсақ көмір қазандықтарын пайдалану олардың суық күйден іске қосылуы кезінде алаудың тұрақты тұтануын бастау және қазандық агрегатының элементтерін біркелкі жылытуды қамтамасыз ету үшін мазутты қолдану талап етілетіндігімен сипатталады (IEA. Available, 2022).

Тұтынылатын мазут мөлшері қазандықтың құрылымдық ерекшеліктерімен, оның бу өнімділігімен және іске қосу кезеңінің ұзақтығымен анықталады (L.Sladewski et al, 2017).

Айта кету керек мазут мұнай өңдеудің жанама өнімі болғанына қарамастан, оның құны жыл сайын артып келеді. Осыған байланысты көптеген елдерде қазандықтарды іске қосу кезінде сұйық отынның үлесін төмендетуге және нәтижесінде жылу энергиясының өзіндік құнын төмендетуге бағытталған зерттеулер жүргізілуде, бұл жылу генерациясының жалпы рентабельділігін арттырады (M.Pawlak, 2016).

Қазіргі ғылыми-технологиялық әдебиеттерді талдау қорытындылары көрсеткендей, қатты отынды жағу кезінде қазандық агрегаттарының тиімділігін арттыру мақсатында пайдалы әсер коэффициентін ұлғайту әдістері қарқынды зерттелуде (Enerdata 2023). Яғни, соның ішінде қосымша жылу көздерін қолдану және тұтыну жануды қарқынды жүргізу технологиялары қарастырылуда (B.Loewen, 2022).

Келешегі зор бағыттардың бірі қосымша сұйық отынға қажеттілікті азайтуға іске қосу шығындарын азайтуға және қазандық агрегаттарының экологиялық және энергетикалық көрсеткіштерін арттыруға мүмкіндік беретін отынның плазмалық активациясын қолдану болып табылады.

Қазіргі уақытта көптеген қазандық қондырғыларында қазандықты тұтату және тұрақты жұмыс режиміне жеткізу үшін сұйық отын-мазутты қолдануда. Бұл мазуттың жоғары калориялы сипаттамаларына және тұтану сенімділігіне байланысты. Алайда, мазутты қолдану бірқатар маңызды шектеулермен бірге жүреді. Оның тиімді жануын қамтамасыз ету үшін алдын ала кем дегенде 80-100 °C қыздыру қажет, бұл отынның тұтқырлығын төмендетеді және оны оттегімен жақсы араласуына ықпал етеді (V.Messerle et al, 2022). Қыздыру температурасын жоғарылату жанудың тұрақтылығын арттырады, жылу шығынын азайтады, жанбаған бөлшектер мөлшері төмендейді және қазандық агрегатының пайдалы әсер коэффициентінің өсуіне ықпал етеді (P.Kanilo et al, 2003). Алайда, бұл технологияның құны қымбат болып қала береді, өйткені мазуттың бағасы жыл сайын артып келеді, ал отын дайындаудың өзі көп уақытты қажет ететін процесс. Қосымша туындайтын мәселе-мазуттағы күкірттің едәуір мөлшері (M Gorokhovski et al, 2005). Оны жағу кезінде күкірт оксидтері түзіледі, олар жоғары температураны коррозияны күшейтеді, металл конструкцияларының ресурсын азайтады және жабдықты жөндеу және техникалық қызмет көрсету шығындарын арттырады. Қазіргі заманғы ғылыми-зерттеу орталықтары, инженерлік ұжымдар мен энергетикалық компаниялар мазутты тұтатуға арналған ескірген жүйелерден бас тартуға мүмкіндік беретін технологияларды әзірлеумен белсенді айналысады (IEA. Available, 2023). Бұл тек экологиялық талаптарға ғана емес, сонымен қатар тапшы және қымбат сұйық отынды пайдалануды азайтудың жаһандық тенденциясына байланысты. Сонымен қатар, мұнай өндірудің тұрақты төмендеуі байқалады, бұл мазут өндірісін экономикалық жағынан тиімді етпейді (D.Glushkov et al, 2018).

Осылайша, қазандық қондырғыларын іске қосудың заманауи, үнемді және ұзақ мерзімді технологиялары қажет. Тозаңкөмірлі қазандықтарды тұтатудың келешегі бар технологияларының бірі плазмалық отын жүйелерін (ПОЖ) қолдану болып табылады (D.Glushkov et al, 2021). Жұмыс принципі тұрақты тоқты плазматрон арқылы генерацияланатын жоғары температуралы плазмалық доғамен тозаң-көмір отынын қыздыруға негізделген. (F.Zhao et al, 2016.). Технологияның өзі АҚШ, Канада, Германия және Қытайдың тозаңкөмір электр станцияларында кеңінен қолданылуда. (S.Bolegenova et al, 2023). Алайда, тұрақты ток плазматрондарын пайдаланудың бірқатар кемшіліктері бар: электродтардың салыстырмалы түрде аз ресурсы (шамамен 500 сағат), күрделі салқындату жүйелерінің қажеттілігі, плазма түзетін газды беру қажеттілігі, тұрақты ток көздерінің жоғары құны мен өлшемдері.

Мұның баламалы шешімі – айнымалы ток плазматронын қолдануға негізделген плазмалық аса тұтандыру жүйесі (ПАТ) болып табылады. (T.Maczka et al, 2020). Бұл

жүйеде көмірдің тозаң – ауа қоспасы электрод блогы арқылы өтеді бұл отынның жоғары температуралы плазмалық доғамен өзара әрекеттесу уақытын арттырады (R.Youssefi et al, 2021). Айналмалы ток плазмотроны қарапайым дизайнымен, сұйықтықты салқындату қажеттілігінің жоқтығымен, электр қуатын аз тұтынумен (2-10 кВт) және бірнеше жылға жететін айтарлықтай үлкен үздіксіз жұмыс ресурсымен ерекшеленеді. Плазмалық тұтандыру жүйесін қолдану мазутты мазутты пайдалану мөлшерін едәуір азайтуға немесе толығымен жоюға, пайдалану шығындарын азайтуға және қазандық жабдықтарының экологиялық көрсеткіштерін арттыруға мүмкіндік береді.

Жұмыстың мақсаты – отынды тұтандырудың келешегі бар технологиясын іске асыру үшін айнымалы токтағы жоғары вольтті плазматронды қолдану мүмкіндіктері мен оның параметрін зерттеу болып табылады.

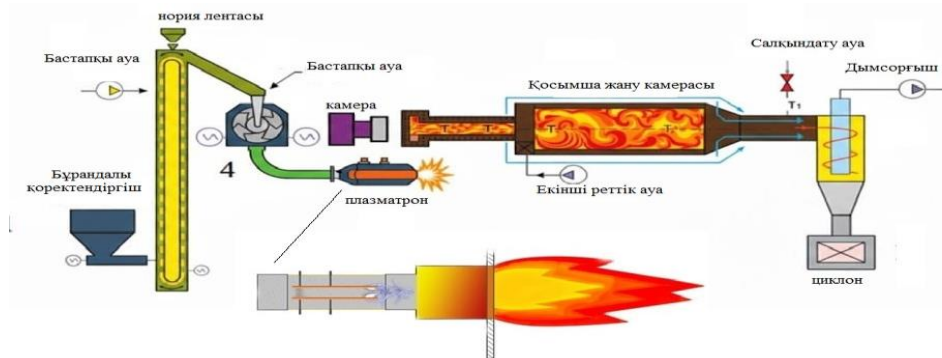
ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Көмір шаңының тұтану процестеріне эксперименттік зерттеулер С.С. Кутателадзе мамандарының тікелей қатысуымен жүргізілді. 1-суретте қондырғының технологиялық жолының схемалық диаграммасы көрсетілген. Шикі көмір бункерінен шнекті қоректендіргіш арқылы үздіксіз әрекет ететін нория типті көтергіш-тасымалдау құрылғысына беріледі. Отын қоспасын ұсақ ұнтақтау үшін, қыздырғыш калориферде алдын ала қыздырылған бастапқы ауамен бірге балғалы диірменге жіберіледі (ұнтақталған отын бөлшегінің орташа мөлшері R-90 мкм). Алынған шаң-көмір қоспасы плазматронға беріледі, онда оның тұтануы жүреді. Тұтануды бастау ауаны тотықтырғышты және плазмалық разрядты құрайтын электр тұрақты тоғын беру арқылы қамтамасыз етіледі.

Оттық құйынды тангенциалды отын беру режимінде де, тікелей ағын режимінде де жұмыс істей алады. Пештің негізгі элементтері (1-сурет) мыналар: отын беру жүйесі; от жағу өсінде орналасқан ПАТ үшін тікелей ағымды оттық; өлшеу датчиктері мен бақылау терезелері бар жану камерасы; қайталама ауаны тангенциалды жеткізетін жану камерасы болып табылады. Шаң-көмір қоспасының толық жанып кетуін қамтамасыз ету үшін жану камерасына тотығудың химиялық реакцияларының барысын күшейтетін қосымша істық ауа беріледі. Шаң-көмір қоспасы электр доғасының түйініне түседі, онда оның тұтануы плазмалық доғалардың өтуімен басталады. Одан әрі жанғыш қоспаның ағыны тік ағын режимінде жану камерасына түседі және тангенциалды айналдыру аппаратынан берілетін екінші реттік ауа (Рв2) арқылы араласады. Белсенді жану аймағынан өткеннен кейін жанбаған отын қалдықтары қайта жану камерасына түседі, онда олар тангенциалды түрде берілетін үшінші реттік ауамен әрекеттеседі. Барлық тәжірибелерде берілген ауа температурасы 22 °С болды. Аталған жұмыстың аясында тәжірибелік отындық камерасында көмір шаңының тік ағынды жану жағдайында ПАТ-ны тәжірибелік-өндірістік сынақтардан өткізілді. Жану процесі аяқталғаннан кейін, қондырғыны салқындату үшін ауа беріледі. Әрі қарай, шығатын газдар Вентури скрубберіне жіберіледі, онда орталықтан тепкіш күштердің әсерінен күлдің ірі бөлшектері қабырғаларға түсіп, циклонға жіберіледі. Тазартылған газдар түтін сорғыш арқылы атмосфераға шығарылады.

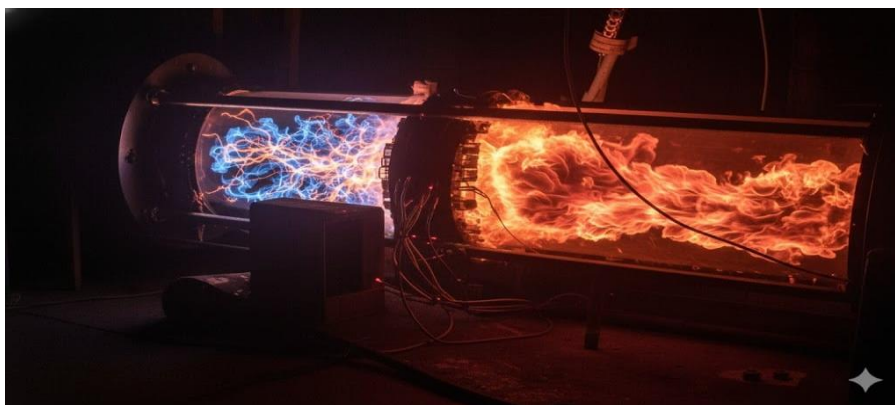
Көмір шаңы тұтандырудың плазмалық технологиясының схемалық көрінісі 1-суретте келтірілген. Плазмалық аса тұтану (ПАТ) технологиясы дәстүрлі резервтік сұйық отындарды, атап айтқанда мазутты қолдануға негізделген қазандық агрегаттарын жағудың және алауды тұрақтандырудың әдістерін ауыстыруды қамтамасыз етеді. Бастапқы ауамен алдын ала араластырылған көмір шаңы жоғары температуралы плазмалық доғалар түзілетін плазмотронның электр доғалық модуліне беріледі. Бұл доғалар шаң-көмір отыны бөлшектерінің тұтану процестерінің жылдам іске қосылуын қамтамасыз ететін жылу энергиясының шоғырланған көзі ретінде қызмет етеді. Алынған

жоғары реактивті шаң-көмір қоспасы жану камерасына түседі, онда ол екінші реттік ауа ағынымен қарқынды әрекеттерседі. Нәтижесінде алаудың тұрақты түрде лаулауына және қазандықта көмір отынын одан әрі тиімді жану процесі жүреді.



1-сурет. Эксперименттік стенд плазмалық аса тұтану (ПАТ) технологиясы
Ескерту - авторлармен WinCC бағдарламасының көмегімен құрастырылған

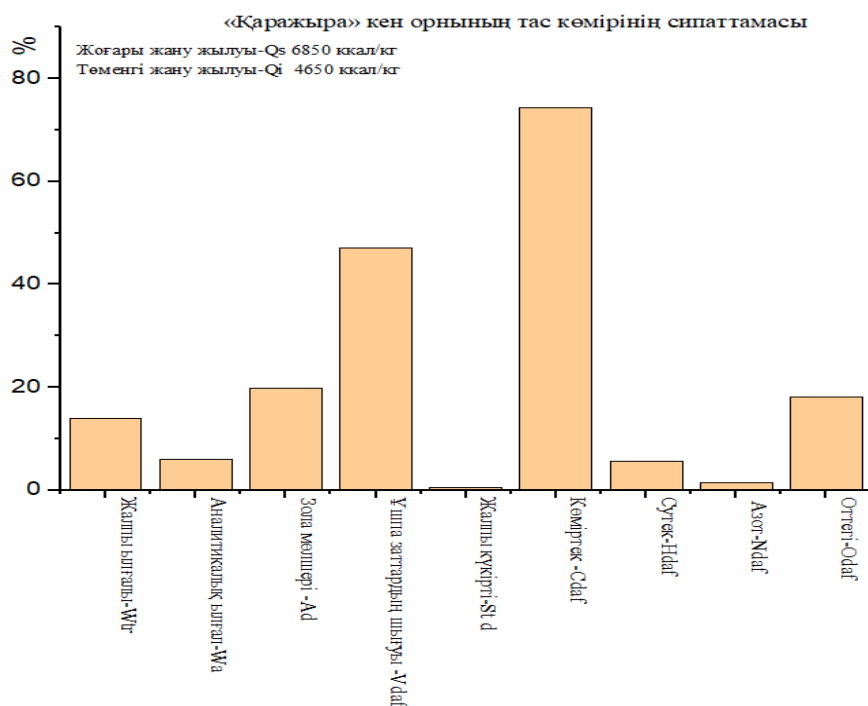
ПАТ жүйесінің негізгі функционалды элементі плазмалық разрядтардың қалыптасуы мен сақталуын қамтамасыз ететін электр доғалық блок болып табылады. Құрылымдық жағынан, электр доғалық қондырғыға сегіз өткізгіш изоляторға мықтап бекітілген екі жұп цилиндрлік мыс электродтары кіреді (2-суретті қараңыз). Электродтарды қоректендіру арнайы жиілік түрлендіргіштері арқылы жүзеге асырылады. Олар берілген пішіндегі шығыс кернеуін қамтамасыз ететін жоғары жиілікті транзисторлық инвесторды, сондай-ақ бірегей конструкциядағы жоғары жиілікті жоғары вольтты трансформаторды қамтиды. Мұндай қуат көзі архитектурасы жоғары жылулық және электрлік жүктемелер жағдайында электродтық жүйелердің тұрақты жұмысын қамтамасыз етеді. Жұмыс істеу процесінде электрод аралық кеңістіктерде екі тәуелсіз электр доғалары пайда болады (2-сурет), олар плазмалық ағынды генерациялау үшін жоғары концентрацияланған энергия көзі ретінде қызмет етеді. Доға аймағындағы плазманың температурасы бірнеше мың градусқа жетуі мүмкін, бұл жылу ыдырауының лезде басталуына және көмір шаңының тұтануына жағдай жасайды.



2-сурет. Электр доғалық бөлігіндегі көмір шаңының тұтануы
Ескерту - авторлармен эксперимент кезінде жасалған

Эксперимент барысында көмір шаңының жану процесіне визуалды мониторинг жүргізіліп, сондай-ақ тәжірибелік стендтің ұзындығы бойындағы температуралық өріс

мөлшері орындалды. Отын ретінде Қаражыра кен орнының Д маркалы тас көмірі пайдаланылды, оның негізгі физикалық-химиялық сипаттамалары төменде келтірілген. Көмір R90=40% електен қалған балғалы диірменнен кейін алынды.



3-сурет. Қаражыра көмірдің құрамы

Ескерту - авторлармен Origin бағдарламада құрастырылған

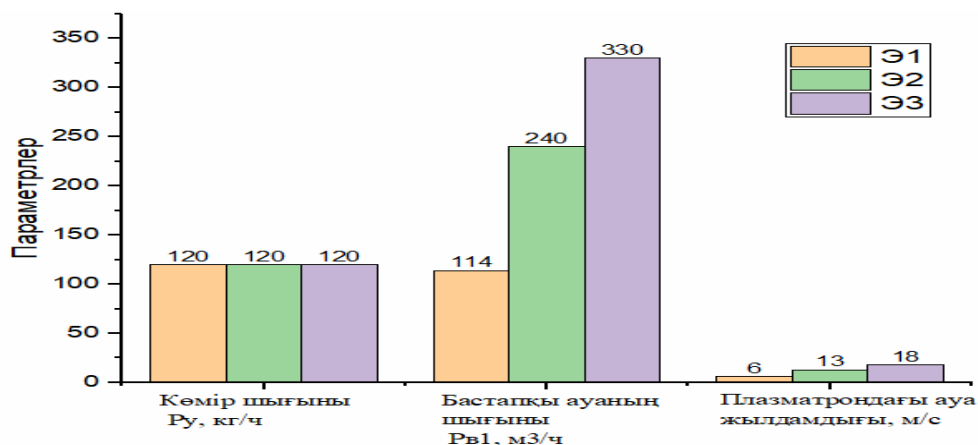
НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Бастапқыда ПАТ жүйесін қосу және бастапқы ауаны беру жүзеге асырылды, ал плазмотронның жұмысына жұмсалатын қуат 5кВт тең. ПАТ іске қосылуы жану камерасына түсетін ауа температурасының орташа мөлшерде көтерілуіне әкеледі, бұл шаң-көмір қоспасын алдын ала қыздыруды қамтамасыз етті және оның тұтануын жеңілдетті. ПАТ технологиясының сипаттамалық жұмыс режимдерін анықтау үшін эксперименттер екі кезең бойынша жүргізілді.

Эксперименттердің бірінші сериясының мақсаты (Э1, Э2, Э3) (4-сурет) Көмір шаңының тұтану параметрлері бастапқы ауа шығынына және қоспаны электродоғалық блокқа беру жылдамдығына байланысты анықталды. Бастапқы ауа шығыны көмір шаңын плазматронға жеткізуге жеткілікті ең төменгі мәннен бастап, камерадағы факелдің үзілуі мен жану процесінің тұрақсыздануы байқалатын ең жоғары мәнге дейін өзгертіліп отырды.

Бірінші экспериментте электр доғасының төменгі аймағында көмір шаңының ішінара бөлінуі байқалды. Осыған қарамастан, көмір шаңының тұтануы тұтану тұрақты болып, жалынның салыстырмалы түрде төмен жарықтығымен сипатталады. Жану камерасының қабырғаларын 900 °С температураға дейін қыздыру үшін 500 секунд қажет болды. Жану камерасының бақылау терезесі арқылы жанбай қалған көмір бөлшектері тіркелді, бұл бастапқы ауа ағыны төмен болған кездегі отынның толық жанбауын көрсетеді.

Екінші экспериментте ауа ағыны 240 м³/сағ дейін ұлғайтылды. Осы жағдайларда көмір бүкіл эксперимент бойы электрдоғалық блокта тұрақта түрде тұтанып, жану камерасында орнықты алау түзілді. Камераның 900 °С температураға шығу уақыты 200 секундты құрады, бұл жылу режимінің қарқындылығының жоғарылауын көрсетеді.



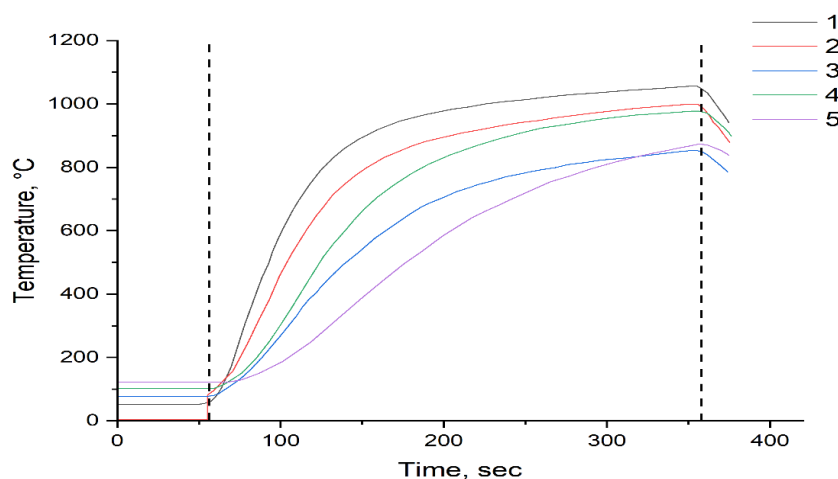
4-сурет. Эксперименттің бірінші кезеңінен алынған мәліметтер

Ескерту - авторлармен Origin бағдарламада құрастырылған

Үшінші экспериментте, көмір шаңын электродоғалық блокқа жеткізу жылдамдығы 18 м/с болғанда, тұтану тек жартылай ғана жүзеге асады. Ал көмір шаңының негізгі массасы жану камерасына толық жанбай камераға түсіп, жоғары жылдамдықта отын жеткізілген кезде плазмалық разрядтың жануды толық бастауға жеткілікті энергиясы жоқ екенін көрсетеді.

Эксперименттердің екінші сериясында отын беру режимдерін өзгерту кезінде ауа ағыны тұрақты болып, көмір шаңының массасы өзгеріп отырады (5-сурет). Бұл жағдайда α жану камерасындағы артық ауа коэффициенті 0,7-ден 0,5-ке дейін төмендеді, бұл отын жүктемесінің алаудың тұрақтылығына және жанудың толықтығына әсерін бағалауға мүмкіндік береді.

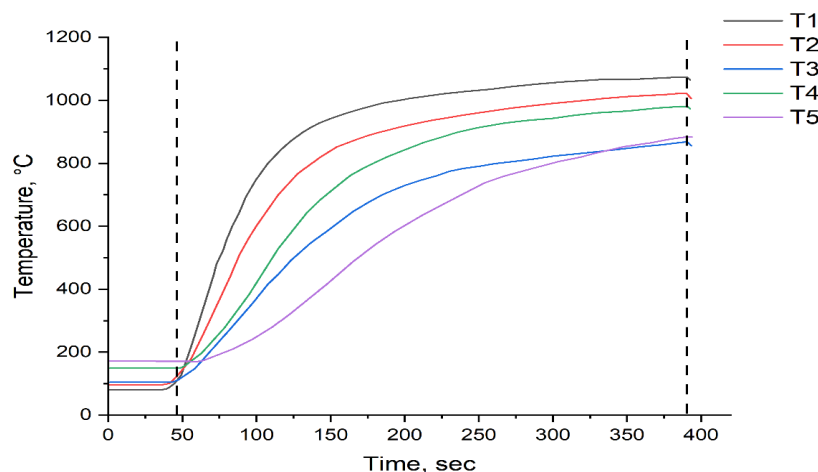
5-7-суреттерінде 1-3 режимдердегі жартылай өнеркәсіптік эксперименттік стендтегі температураның уақытша тәуелділігі көрсетілген (5-сурет). Плазмотрон арқылы генерацияланған жоғары температуралы плазмалық доғалар арқылы тас көмір ұнтақ қоспасының өтуі отынды тұтатуды және жану камерасында тұрақты жануды қамтамасыз етті.



5-сурет. ПАТ қолданғандағы салқын күйден жағу режимінде жану камерасы бойымен температураның таралуы, мұндағы көмір шығыны 103 кг/сағ.

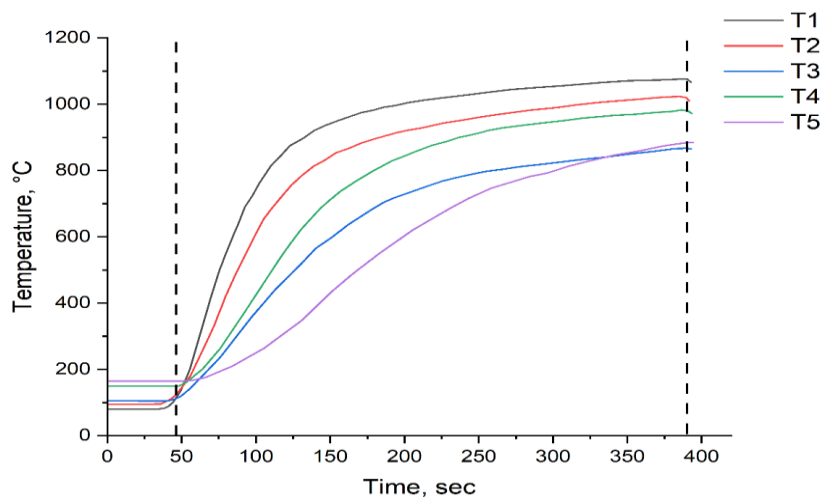
Ескерту - эксперименттік деректерді өңдеу SigmaFlame бағдарламасының көмегімен және авторлармен құрастырылған

Әр эксперименттің ұзақтығы шамамен 5 минутты құрады, бұл от жағу кеңістігін 1000 °C температураға дейін қыздыру үшін жеткілікті болады, сонымен қатар ауа ағынының жоғарылауы және шаң-көмір қоспасының берілу жылдамдығын оңтайландыру плазмалық алаудың тұрақтылығын едәуір арттырады және жану камерасында жұмыс температурасына жетуін тездетеді, сонымен бірге жанбаған көмір бөлшектерінің санын азайтады.



6-сурет. ПАТ 122 кг/сағ режимін қолдана отырып, салқын күйден жану режимінде эксперименттік стендтің ұзындығы бойынша температураның таралуы

Ескерту - эксперименттік деректерді өңдеу SigmaFlame бағдарламасының көмегімен және авторлармен құрастырылған



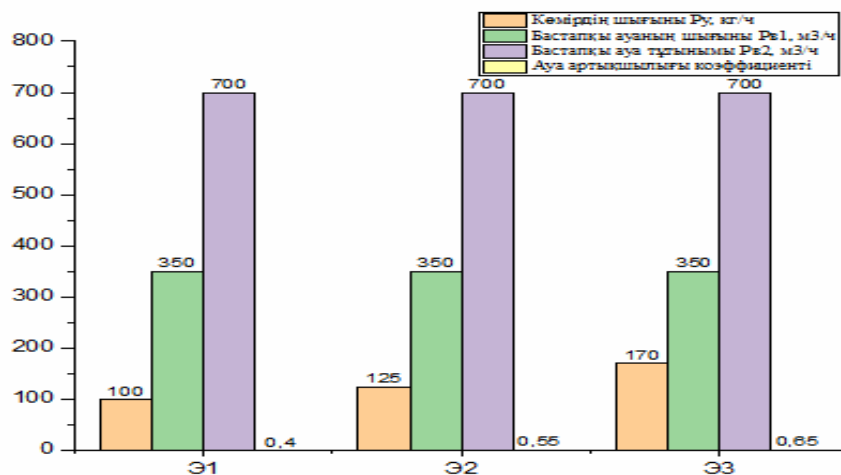
7-сурет. ПАТ қолдана отырып, салқын күйден жағу режимінде жану камерасы бойымен температураның таралуы, көмір шығыны 168 кг/сағ

Ескерту - эксперименттік деректерді өңдеу SigmaFlame бағдарламасының көмегімен және авторлармен құрастырылған

Негізгі жану аймағы жану камерасының бастапқы бөлігінде шоғырланған және мұнда 1 термopapa орнатылған (5-7 суреттер). Көмір шаңын ұнтағы беріле басталғаннан кейін температураның тез өсуі байқалады, бұл плазмалық разряд аймағында тұтанудың жоғары тиімді басталуын көрсетеді.

Барлық зерттеулер режимдерінде көмір шаңының тұрақты жануы және кейіннен жануы тіркелген. 1-режимінде жану камерасындағы температураның жоғарылау жылдамдығы 2 және 3 режимдерімен салыстырғанда төмен, бұл отын жүктемесі мен бастапқы ауа ағынының төмендеуіне байланысты. 2 және 3 режимдері ұқсас сипаттамаларды көрсетеді: жану камерасының қыздыру жылдамдығы және эксперименттік стендтің ұзындығы бойынша температура профилі бірдей.

Көмір ұнтағының шығынын арттыру жану камерасындағы температураның көтерілуіне әкеледі, бұл жанудың қарқындырақ болуын және отын камерасының тезірек қызуын қамтамасыз етеді. Сондай-ақ, жоғары жүктемелер кезінде жану камерасының ұзындығы бойынша температура өрісін теңестіру үрдісі байқалады, бұл жылу алмасудың жақсарғанын және отынның біркелкі жануын көрсетеді.



8-сурет. Эксперименттердің екінші сериясынан алынған мәліметтер
Ескерту - авторлармен Origin бағдарламада құрастырылған

Жүргізілген тәжірибелердің нәтижесі бойынша плазмалық қарқынды жану ПАТ технологиясының 5 кВт плазмотрон қуатында көмір ұнтағын тұтату және тұрақты жануды қамтамасыз ету үшін тиімді екенін растайды. Алынған деректер ПАТ пайдалану мыналарды қамтамасыз ететінін көрсетеді.

- Отын мен ауаның әртүрлі режимінде көмірдің тұрақты тұтануы;
- Қысқа уақыт ішінде жану камерасын жұмыс температурасына дейін (1000 °C дейін) жедел қыздыру;
- Біркелкі алаудың пайда болуы және жанудың жоғары толықтығын қамтамасыз ете отырып, толық жанбаған бөлшектердің санын азайтады;
- Реттеу мүмкіндігі жану қарқындылығы мен температуралық профиль ұзындығы бойынша от жағу кеңістігін өзгерту есебінен көмірдің және бастапқы ауа.

Осылайша, 5 кВт қуаты ПАТ технологиясы дәстүрлі қазан тұтатудың әдістеріне және көмір ұнтағын жануды тұрақтандыруға тиімді балама ретінде қолданылуы мүмкін, қосалқы отынға кететін энергияны азайтып, отын камерасының жабдықтарының сенімділігін арттырады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Көмір отынын плазмалық аса тұтандырудың (ПАТ) жаңа технологиясы әзірленіп, жобаланды, ол қуат диапазоны 2-ден 10 кВт-қа дейінгі айнымалы ток плазматорын қолдануға негізделген.

Пилоттық қондырғыдағы эксперименттік зерттеулер электр доғалық блоктағы шаң-ауа қоспасының жылдамдығы жану мен жану тұрақтылығына айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. Көмір отынының тұрақты тұтануы 6-13 м/с диапазонында электр доғалық блокқа қоспаны беру жылдамдығы кезінде қамтамасыз етілетіні анықталды. Артық ауа коэффициенттері 0,7-ден 0,5-ке дейін болған кезде эксперименттік стендтің 1000 °C жұмыс температурасына шығу уақыты 200 секундтан аспады. Электр доғалық қондырғыға көмір отынының берілуінің артуымен тұтану процесінің қарқындылығы байқалады: Жану камерасындағы жалын бірден пайда болады, бұл ПАТ-нің жоғары энергетикалық тиімділігін көрсетеді. Алынған нәтижелер бұл технологияны жылу электр станцияларында және қазандық қондырғыларында көмір ұнтаған тұтатуға және жануды жеделдетуге қолдану мүмкіндігін растайды. Эксперименттік деректер сонымен қатар ПАТ-технологиясы құрамында ұшпа заттар көп маркаларды қоса алғанда, суық күйден тас көмірді жағуға мүмкіндік беретінін көрсетеді. Бұл технологияны өнеркәсіптік пайдалануға енгізу мақсатында оны өнеркәсіптік сынақтан өткізу перспективасын ашады. ПАТ технологиясы көмір электр станциялары мен қазандық қондырғыларында отынды тұтатуда және жануды ұстап тұруда мазут отынына балама ретінде ұсынылуы мүмкін, қамтамасыз ете отырып:

- жұмыс температурасына жедел қол жеткізу;
- көмір ұнтағының тұрақты тұтануы мен жануы;
- қосалқы сұйық отын шығынын азайту;
- пеш жабдығы жұмысының сенімділігі мен экологиялылығын арттыру.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Автор(лар) мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Зерттеу жеке қаржыландыру көздерін пайдалану арқылы жүргізілді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Fragkos, P., Dalla Longa, F., Zisarou, E., van der Zwaan, B., Giannousakis, A., & Fattahi, A. (2023). Exploring model-based decarbonization and energy efficiency scenarios with PROMETHEUS and TIAM-ECN. *Energies*, 16(18), 6421. <https://doi.org/10.3390/en16186421>
- Nakamura, T., Maruyama, A., Masuda, S., & Lloyd, S. (2024). The impact of Russia's invasion of Ukraine on Germany's energy choice attitudes among residents in German states with nuclear power plants in commission or decommissioned. *Sustainability*, 16(5), 1999. <https://doi.org/10.3390/su16051999>
- Gajdzik, B., Wolniak, R., Nagaj, R., Żuromskaitė-Nagaj, B., & Grebski, W. W. (2024). The influence of the global energy crisis on energy efficiency: A comprehensive analysis. *Energies*, 17(4), 947. <https://doi.org/10.3390/en17040947>
- ASTM International. (2024). *Coal standards and gas standards*. Retrieved December 5, 2024, from <https://store.astm.org/products-services/standards-and-publications/standards/coal-standards-and-gas-standards.html>
- International Energy Agency. (2023). *World Energy Investment 2023*. IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023>
- Śladewski, Ł., Wojdan, K., & Świrski, K. (2017). New approach to optimizing combustion in power boilers using software inspired by the immune system integrated with an in-furnace temperature monitoring system. *Journal of Power Technologies*, 97(4), 308–313.
- Pawlak, M. (2016). Performance analysis of power boiler drum water level control systems. *Acta Energetica*, 4, 81–96. <https://doi.org/10.52710/ae.410>
- Enerdata. (2023). *Share of wind and solar in electricity production*. Retrieved July 6, 2023, from <https://yearbook.enerdata.net/renewables/wind-solar-share-electricity-production.html>

- Loewen, B. (2022). Coal, green growth and crises: Exploring three European Union policy responses to regional energy transitions. *Energy Research & Social Science*, 93, 102849. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102849>
- Messerle, V. E., Ustimenko, A. B., & Tastanbekov, A. K. (2022). Plasma ignition of solid fuels at thermal power plants. Part 1. Mathematical modeling of plasma-fuel system. *Thermophysics and Aeromechanics*, 29(2), 295–310. <https://doi.org/10.1134/S0869864322020135>
- Kanilo, P. M., Kazantsev, V. I., Rasyuk, N. I., Schünemann, K., & Vavriv, D. M. (2003). Microwave plasma combustion of coal. *Fuel*, 82(2), 187–193. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00201-6](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00201-6)
- Gorokhovski, M., Karpenko, E. I., Lockwood, F. C., Messerle, V. E., Trusov, B. G., & Ustimenko, A. B. (2005). Plasma technologies for solid fuels: Experiment and theory. *Journal of the Energy Institute*, 78(4), 157–171. <https://doi.org/10.1179/174602205X68261>
- International Energy Agency. (2022). *World Energy Outlook 2022*. IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- Glushkov, D. O., Kuznetsov, G. V., Chebochakova, D. A., Lyakhovskaya, O. E., Shlegel, N. E., Anufriev, I. S., & Shadrin, E. Y. (2018). Experimental study of coal dust ignition characteristics at oil-free start-up of coal-fired boilers. *Applied Thermal Engineering*, 142, 371–379. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.010>
- Glushkov, D., Matiushenko, A., Nurpeiis, A., & Zhuikov, A. (2021). An experimental investigation into the fuel oil-free start-up of a coal-fired boiler by the main solid fossil fuel with additives of brown coal, biomass and charcoal for ignition enhancement. *Fuel Processing Technology*, 223, 106986. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106986>
- Zhao, F., Li, S., Ren, Y., Yao, Q., & Yuan, Y. (2016). Investigation of mechanisms in plasma-assisted ignition of dispersed coal particle streams. *Fuel*, 186, 518–524. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.078>
- Bolegenova, S., Askarova, A., Georgiev, A., Nugymanova, A., Maximov, V., Bolegenova, S., & Mamedov, B. (2023). The use of plasma technologies to optimize fuel combustion processes and reduce emissions of harmful substances. *Energy*, 277, 127635. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127635>
- Yantai Longyuan Power Technology Co., Ltd. (2023). *Plasma ignition and combustion stabilization (PICS) technology for pulverized coal-fired boilers*. Retrieved December 29, 2023, from <https://en.lypower.com/plasma-ignition-and-combustion-stabilization-picstechnology-for-pulverized-coal-fired-boilers-product/>
- Mączka, T., Pawlak-Kruczek, H., Niedźwiecki, Ł., Ziaja, E., & Chorańczewski, A. (2020). Plasma assisted combustion as a cost-effective way for balancing of intermittent sources: Techno-economic assessment for 200 MWel power unit. *Energies*, 13(19), 5056. <https://doi.org/10.3390/en13195056>
- Youssefi, R., Maier, J., & Scheffknecht, G. (2021). Pilot-scale experiences on a plasma ignition system for pulverized fuels. *Energies*, 14(16), 4726. <https://doi.org/10.3390/en14164726>

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Канапинов Медет Серикович – PhD докторы, Сәулет құрылыс және энергетика мектебінің аға оқытушысы, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қаласы, Қазақстан

Канапинов Медет Серикович – доктор PhD, старший преподаватель школы архитектуры строительства и энергетики, Восточно-Казakhstanского технического университета им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Kanapinov Medet Serikovich – Doctor PhD, Senior Lecturer at the School of Architecture, Construction and Energy, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
e-mail: mega_bum_90@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6249-2373>,



Бутаков Евгений Борисович – техника ғылымдарының кандидаты, РФА СБ В.Е. Кутателадзе атындағы Жылуфизика институты, Новосибир, Ресей.

Бутаков Евгений Борисович – кандидат технических наук, Института теплофизики им. В.Е. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

Butakov Evgenii Borisovich – Candidate of Technical Sciences, V.E. Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia.
e-mail: e_butakov@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9504-9629>



Дуйсембаева Гүлнур Сеитхановна – 8D07103 «Жылуэнергетика» мамандығының докторанты, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Дуйсембаева Гүлнур Сеитхановна – докторант по специальности 8D07103 – «Теплоэнергетика», Восточно-Казakhstanский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Duysembaeva Gulnur Seitkhanovna – Doctoral student specialty 8D07103 - "Heat power", East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: gdyusembaeva80@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5059-8223>



Измайлов Леонид Николаевич – 7М05301 – «Техникалық физика» мамандығы бойынша магистрант, Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Д. Серікбаева, Өскемен қ., Қазақстан

Измайлов Леонид Николаевич – магистрант по специальности 7М05301 – «Техническая физика», Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Izmailov Leonid Nikolaevich – master's student in the field of 7M05301 – Technical Physics at D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: leonplay200415@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2058-0046>



Қизатов Айбар Советбекұлы – металлургиялық инженерия» мамандығы бойынша докторант, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Қизатов Айбар Советбекұлы – докторант по специальности «Металлургическая инженерия», Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Kizatov Aibar Sovetbekuly – doctoral candidate in the specialty «Metallurgical engineering», East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: kizatov.aibar.sovetbekuly@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6627-9742>



Даулетханов Ерхат Даулетханұлы – техника ғылымдарының магистры, Люблин технологиялық университеті, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Даулетханов Ерхат Даулетханұлы – магистр технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Dauletkhanov Yerhat Dauletkhanuly – master of technical sciences, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: edauletkhanov@edu.ektu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5632-0391>