

Торайғыров университетінің хабаршысы  
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
Вестник Торайғыров университета

---

# Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы  
1997 жылдан бастап шығады



## ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия  
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

---

№ 1 (2026)

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**  
**Вестник Торайгыров университета**

**Энергетическая серия**  
выходит 4 раза в год

---

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о постановке на переучет периодического печатного издания,  
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития  
Республики Казахстан

**Тематическая направленность**

публикация материалов в области электроэнергетики,  
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и  
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

**Подписной индекс – 76136**

---

<https://doi.org/10.48081/BGQF1934>

**Бас редакторы – главный редактор**

Талипов О. М.

*доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)*

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындык Ә.Б., *доктор PhD*

**Редакция алқасы – Редакционная коллегия**

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошекков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шерьязов С. К.	<i>т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)</i>
Искакова З. С.	<i>технический редактор</i>

---

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели  
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

**А. С. Аскарова<sup>1</sup>, С. А. Болегенова<sup>2</sup>,  
В. Ю. Максимов<sup>3</sup>, \*Д. Д. Тоқтаров<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті,  
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1797-1463>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5001-7773>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4120-1071>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9557-9012>

\*e-mail: [toktarrow@gmail.com](mailto:toktarrow@gmail.com)

## **ЖОҒАРЫ КҮЛДІ КӨМІРДІ ТИІМДІ ЖАҒУ ҮШІН ОҒА ФОРСУНКАЛАРЫН ОРНАТУ БИІКТІГІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ**

Ұсынылған жұмыста БКЗ-75-39ФБ бу қазандығында отынды сатылы жағу кезінде жалын үстінен ауа беру (OFA – Over-Fire Air) технологиясын пайдалану үрдістерінің сандық зерттеу нәтижелері келтірілген. Моделдеу FloREAN бағдарламалық пакетінде RANS *k-ε* турбуленттілік моделін және алты ағынды модельді пайдалана отырып орындалды. Зерттеуде бес жұмыс режимі қарастырылды: базалық (OFA қолданылмаған) және форсункалар 8,0; 9,4; 10,0 және 12,0 м биіктіктерде орнатылған төрт нұсқада, ауа ағынының инжекторлар мен оттықтар арасындағы үлесі 18:82 қатынасында болды. Нәтижелерді ParaView бағдарламасында өңдеу қазандықтың шыға берісіндегі температуралар мен газдар (CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>) концентрацияларының тік профилдерін алу және сипаттамалық статистикалық талдау жүргізу мүмкіндігін берді. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, OFA форсункаларын 9,4 м биіктікте орналастыру жанудың толықтығы мен ластаушы заттардың азаюы арасындағы оңтайлы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді: түтін камерасынан шығатын NO<sub>x</sub> (NO + NO<sub>2</sub>) концентрациясы 564,34-тен 424,22 мг/Нм<sup>3</sup>-ке дейін төмендейді, CO<sub>2</sub> массалық үлесі 0,1562-ден 0,1459 кг/кг-ға дейін азаяды, ал CO мөлшері аздап артады. Сонымен қатар, шыға берістегі температура шамамен 325 °С-қа төмендейді. Барлық жұмыс режимдеріндегі SO<sub>2</sub> шығарындылары Қазақстан Республикасының

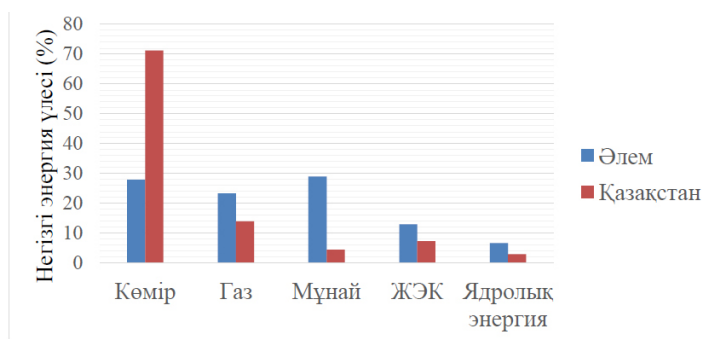
нормативтік шегінде қалады. Алынған нәтижелер ауа ағынының 18%-ын OFA форсункаларына беру және оларды шамамен 9,4 м биіктікте орнату БКЗ-75 типті қазандықтарда  $NO_x$  және  $CO_2$  шығарындыларын азайтатындығын, жылулық қуатты төмендетпей жұмыс істеуге мүмкіндік беретіндігін растайды және бұл технологияны Қазақстанның жылу электр орталықтарына (ЖЭО) енгізу ұсынылады.

*Кілтті сөздер:* CFD модельдеу, БКЗ-75 қазандығы, ұнтақталған көмір отыны, OFA технологиясы,  $NO_x$  азайту, жануды оңтайландыру, түтін газдарының шығарындылары.

### Кіріспе

Көмір қайта жаңартылатын энергия көздерінің жедел дамуына және өсіп келе жатқан климаттық міндеттемелерге қарамастан, әлі күнге дейін әлемдік энергетиканың негізі болып қалуда. Халықаралық энергетика агенттігінің (ХЭА) [1] деректері бойынша 2024 жылы көмір әлемдік бастапқы энергия тұтынуының 27,9%-ын және әлемдік электр энергиясын өндірудің 34%-ын қамтамасыз етті. Көмір үлесінің біртіндеп төмендеуі болжанғанымен, көмір әлі де көмір өндіруші елдердің энергия теңгерімінде ондаған жылдар бойы маңызды рөл атқаратын болады.

Қазақстанда 33,6 млрд тоннаға жуық көмір қоры бар, ал 2023 жылы көмірдің үлесіне бастапқы энергияның 49,6%-ы және электр энергиясының 71,2%-ы тиесілі болды [2]. Алайда, құрамында күлі жоғары қарағандылық көмірді жағатын қолданыстағы БКЗ-75 қазандықтар паркі Қазақстан Республикасының қазіргі заманғы экологиялық нормаларына жиі сәйкес келмейді [3;4]. Бұл шығарындыларды азайту және тиімділікті арттыру үшін жану процестерін жаңғырту қажеттілігін тудырады.



1-сурет – Энергетикалық баланс құрылымын салыстыру: әлем және Қазақстан (2024)

2024–2025 жылдарға арналған жаһандық энергетикалық баланс құрылымында қазба отындары әлі де басым болып тұр. Халықаралық энергетика агенттігінің (ХЭА) [1] және Global Electricity Review 2025 есебінің [5] деректері бойынша, бастапқы энергияның негізгі үлесі мұнайға (шамамен 29 %), одан кейін көмір (26 %) және табиғи газға (22 %) тиесілі. Жаңартылатын энергия көздері (күн, жел, гидро және биоэнергетиканы қоса алғанда) әлемдік энергия балансының шамамен 15% үлесін алады, ал атом энергетикасының үлесі шамамен 5% -ды құрайды.

Қазақстан үшін энергия өндіру құрылымы әлемдік құрылымнан айтарлықтай ерекшеленеді: ҚР Ұлттық статистика бюросының [6] және KEGOC [2] деректері бойынша, электр энергиясының 60 %-дан астамы көмір есебінен, шамамен 20 %-ы табиғи газ есебінен, 10 %-ы гидроэнергетика және 5%-дан азы жаңартылатын энергия көздері есебінен өндіріледі.

Өнеркәсіптік қазандықтардағы азот оксидтерінің ( $\text{NO}_x$ ) шығарындыларын азайтудағы ең кең тараған технологияларының бірі - жалын үстінен ауа беру (OFA - Over Fire Air) технологиясы. Жалпы ауа көлемінің 10-30 %-ын негізгі жану аймағынан жоғары берген кезде жалынның ең жоғарғы температурасы төмендейді және реакция аймағындағы оттегі концентрациясы төмендейді, бұл термиялық  $\text{NO}_x$  түзілуін шектейді [7;8]. Көптеген халықаралық зерттеулер ірі энергия қазандықтары үшін OFA технологиясының тиімділігін растайды [9;10].

Қазақстанда OFA технологиясын енгізу бойынша зерттеулер алғаш рет БКЗ-75 қазандығына қатысты [11;12] еңбектерде жүргізілген. Бұл зерттеулердің нәтижелері бойынша OFA инжекторларына және оттық құрылғыларына ауа берудің оңтайлы арақатынасы жану камерасына түсетін жалпы ауа көлемінің 18:82 бөлігін құрайды. Дәл осы арақатынас ұшпа компоненттердің толық жануын, жалынның тұрақтылығын,  $\text{NO}_x$  түзілуінің минималды деңгейін және түтін шығу арнасында СО концентрациясының айтарлықтай өспеуін қамтамасыз етеді.

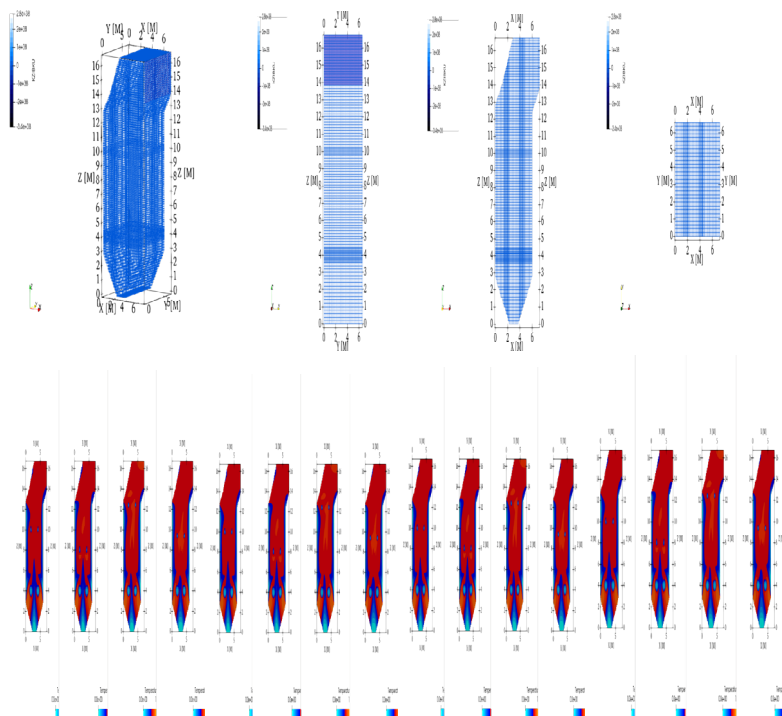
Расталған деректерге сүйенсек, қазіргі зерттеуде де OFA-инжекторлары беретін ауаның 18 %-ы қолданылды, бұл алдыңғы зерттеулердегі [13;14;15;16] салыстырмалылық пен сабақтастықты қамтамасыз етеді.

Айтарлықтай ілгерілеуге қарамастан, шетелдік зерттеулердің басым бөлігі қуаты  $\geq 500$  МВт ірі энергия блогтарына арналған, ал жоғары күлді көмірмен жұмыс істейтін орта қуатты (75 т/сағ) қазандықтарға қатысты зерттеулер шектеулі. Мұндай қондырғылардың Қазақстан энергетикасындағы жоғары үлесін ескере отырып, БКЗ-75 қазандығында OFA-форсункаларын оңтайлы орналастыруды зерттеу ғылыми және тәжірибелік тұрғыда аса маңызды.

Аталмыш жұмыстың мақсаты жоғары күлді Қарағанды көмірін жағу кезінде БКЗ-75 қазандығының жану камерасына ауаны сатылы беру (OFA) процесін кешенді CFD-талдау арқылы зерттеу, шығарындыларды азайту үшін форсункаларды орнатудың оңтайлы биіктігін анықтау және нәтижелерді ұлттық экологиялық нормативтермен салыстыру болып табылады.

### Материалдар мен әдістері

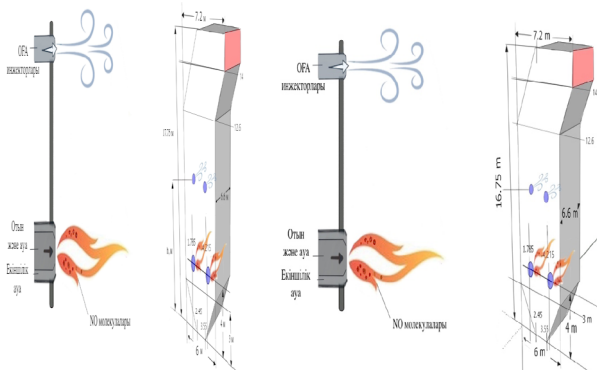
Зерттеу БКЗ-75-39 ФБ қазандығының жану камерасы үшін жүргізілді. Геометриялық модель (7,2×6,6×16,75м) табиғи айналымы бар суқұбырлы қазандықты және төрт алдыңғы жағындағы оттықты сипаттайды. Есептік тор - оттықтар мен OFA форсункалары аймақтарында жергілікті тығыздатылған 450 000 ұяшықты қамтиды (2-сурет).



2-сурет – БКЗ-75-39 ФБ қазандығының жану камерасының геометриясы мен есептік торы

OFA форсункалары оттық деңгейінен ( $z=4$  м) 8; 9,4; 10 және 12 м биіктікте орналасқан. Инжекторлардағы ауаның үлесі жалпы ауа шығынының

18 %-ын құрап, [11;12] деректерінде берілген ұсынымдарға сәйкес келеді. Бұл мән жалынның тұрақтылығын қамтамасыз етеді және жануды төмендетпей,  $\text{NO}_x$  түзілуін тиімді шектеуге мүмкіндік береді.



3-сурет – Жану камерасының сызбасы және OFA беру принципі

БКЗ-75-39ФБ қазандығында Қарағанды бассейнінің КР-200 маркалы қатардағы көмір ұнтағы жағылады. Қазандық қондырғысының негізгі техникалық сипаттамасы, сондай – ақ пайдаланылатын ұнтақты көмір отынының құрамы 1 – кестеде берілген.

1-кесте – БКЗ-75-39ФБ қазандығы жану камерасының базалық режимдегі техникалық сипаттамалары

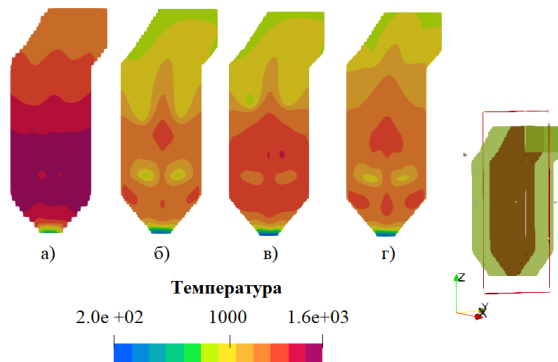
№	Атауы	Белгіленуі	Өлшем бірлігі	Мәні
1	Көмір түрі	КР200	-	-
2	Ұшпа заттардың жанғыш массаға қатынасы	УГ	%	22
3	Жұмыс ылғалдылығы	УР	%	10.6
4	Жану жылыуы	QRH	ккал/кг	4433
5	Қазандықтағы оттықтар саны	NG	шт.	4
6	Бір оттықтың отын шығару өнімділігі	BГ	т/час	3.2

Пайдаланылған көмір құрамы, %						
C	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Күл
43.21	3.6	5.24	1.04	1.21	10.6	35.1

### Нәтижелер және талқылау

Жылу өнімділігіне зерттеу жүргізу ұнтақты көмір отынын жағу кезіндегі жылу мен масса алмасу процестерін модельдеудің маңызды кезеңі болып табылады. Бұл тәсіл жану камерасының барлық көлемі мен оның шығу аймағындағы температуралық өрістерді анықтауға мүмкіндік береді.

4–5-суреттерде жану камерасындағы көмір ұнтағы ағынының жылулық сипаттамасын бейнелейтін температуралық профильдер көрсетілген. Көріп отырғандай, оттық құрылғылар орналасқан тұсқа жақын жердегі температураның мәні жоғары деңгейге жетеді, өйткені бұл жерде ағынның құйынды сипатына байланысты конвективті тасымал ең жоғары мәнге ие болады, нәтижесінде көмір бөлшектерінің тұру уақыты артып, осы аймақтағы температураның өсуіне әкеледі. Дәл оттықтар белдеуі аймағында, отын мен тотықтырғыш өзара әрекеттесетін жерде, жоғары деңгейде жылу бөлетін химиялық реакциялар неғұрлым қарқынды жүреді.



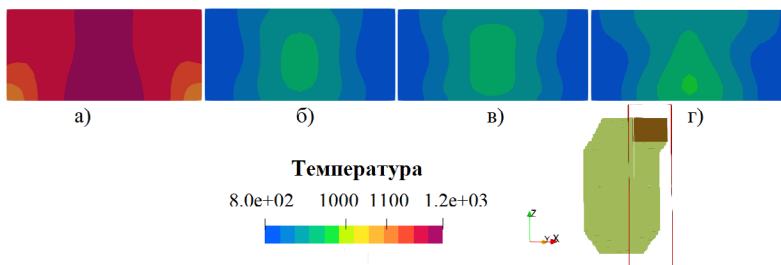
4-сурет – Көлденең қимадағы температура өрісі [°C] ( $y = 3,3$ )

(a) Базалық режим (b) OFA 8 м (c) OFA 9,4 м (d) OFA 12 м

4-суретте турбулентті зат алмасу (аэрокоспаның қозғалысы) ұнтақты көмір жалынының жану камерасының барлық көлеміне, суық воронкадан бастап қазанның бұрылу камерасына дейін таралуына әсер ететіні

көрсетілген. Бұл құбылыс көрсетілген қималардағы орташа температура мәндерімен дәлелденеді, мұнда температура шамамен 1000 °C аралығында өзгеріп отырады. Егер OFA инжекторларының әр түрлі орналасуын салыстырсақ, OFA 9,4 м деңгейінің артықшылығы айқын көрінеді, себебі оның жоғары температура аймақтары басқа конфигурацияларға қарағанда едәуір кеңірек.

Келесі, жану камерасының шығу бөлігіне қарай жылжыған сайын химиялық процестердің қарқындылығы төмендейді (5 - сурет), OFA инжекторларын қолданған кезде температура біртіндеп төмендеп, шығу аймағында шамамен 850 °C деңгейінде болады. Бұл температура қалыпты режиммен салыстырғанда айтарлықтай төмен, алайда әртүрлі OFA конфигурацияларын салыстырғанда олардың арасындағы айырмашылық елеулі емес.



5-сурет – Қазандықтың шыға берісіндегі температуралық өріс ( $x = 7,1$ )  
(a) Базалық режим (b) OFA 8 м (c) OFA 9.4 м; (d) OFA 12 м

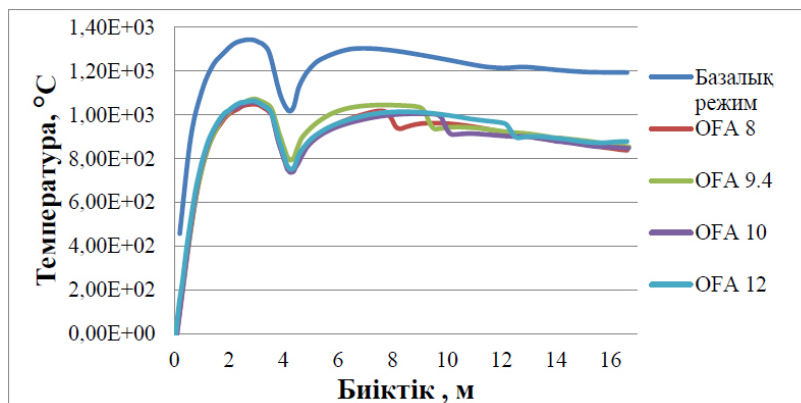
БКЗ-75 қазандығының жану камерасы биіктігінде температураның таралуы екінші реттік ауаны (OFA) әртүрлі беру режимдерінде 6-суретте көрсетілген. OFA қолданылмаған базалық режимде жалынның ең жоғары температурасы оттық аймағында ( $z \approx 2-3$  м) шамамен 1450 °C-қа жетеді, содан кейін биіктіктегі температураның біртіндеп төмендеуі байқалады, бұл ұнтақты көмір отынын бір сатылы жағуға тән құбылыс.

Зерттелген конфигурациялар ішінде ең қолайлы температура таралуын 9,4 м және 10 м биіктікте орналасқан форсункалар қамтамасыз етеді (5-сурет). Осы режимдерде жалын өзегіндегі температура отынның толық жануына жеткілікті деңгейде сақталады, дегенмен  $\text{NO}_x$ -тың термиялық түзілуіне ықпал ететін артық жергілікті максимумдар болмайды.

Салыстыра қарасақ, базалық режимде (OFA-сыз) оттықтардың үстінде екінші температуралық шок байқалады, бұл  $\text{NO}_x$  түзілуінің артуына әкеледі. Форсункалар 12 м биіктікте орналасқандықтан араласу процесі

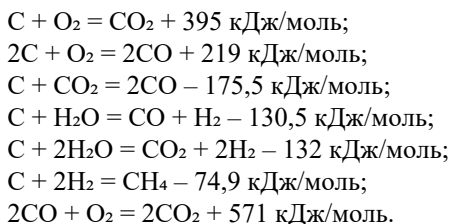
кешеуілдейді, ауа берілетін жазықтықтан төмен жергілікті қызып кету аймақтары сақталады.

Осылайша, форсункаларды 9,4 м биіктікте орналастыру конфигурациясы жану тұрақтылығы, отынның толық жануы және экологиялық көрсеткіштер арасындағы оңтайлы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді. Бұл нәтиже орта қуатты қазандықтардағы OFA-ны оңтайландыруға арналған алдыңғы зерттеулердің деректерімен үйлеседі.

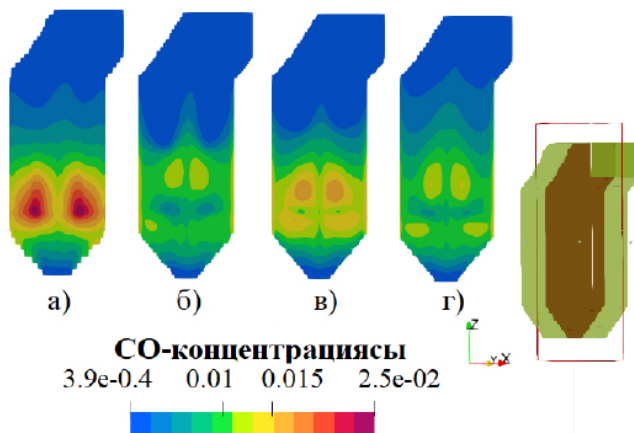


6-сурет – Қазандық биіктігі бойынша температураны бөлу

Көміртектің жоғары температурада жану процесінің соңғы нәтижесі болып оның оттеппен қосылуының салдарынан не көміртек тотығының (CO), не көмірқышқыл газының (CO<sub>2</sub>) түзілуі саналады. Төмен температуралы жану кезінде пеш камерасында көміртектің CO<sub>2</sub> түзе отырып тотығу реакциясы басым болады, ал жоғары температуралы жағдайда негізгі реакциялар бөлшектердің сыртқы бетінде және кеуектерінің ішінде жүреді:

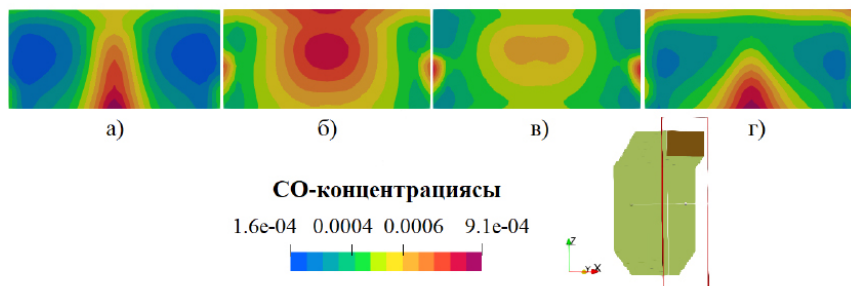


Осылайша, отын құрамындағы көміртектің тотықтырғыштағы оттегімен әрекеттесуінің химиялық процестері, көміртек оксидтерінің ( $\text{CO}$  және  $\text{CO}_2$ ) түзілуіне әкелетін, жанудың әртүрлі кезеңдерінде бірізді жүретін реакциялармен сипатталады. Жану процесінде  $\text{CO}$  және  $\text{CO}_2$  концентрацияларының өзгеру динамикасын көрсететін бұл механизм (7–11 - суреттерде) толықтай анық көрсетілген.



7-сурет – Қазандықтан алынған бойлық қимадағы  $\text{CO}$  концентрациясының таралуы [кг/кг] ( $y=3,3$ ): (a) Базалық режим; (b) OFA 8 м; (c) OFA 9,4 м; (d) OFA 12 м.

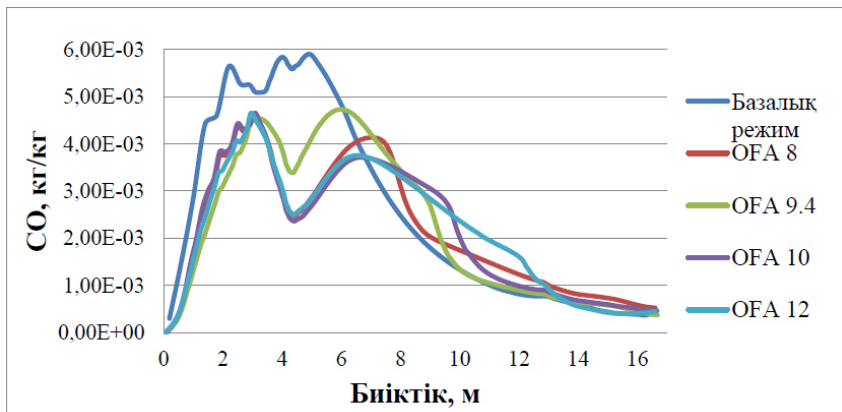
7 – суреттегі қазандықтың көлденең қимасын талдай отырып, OFA 8 м және OFA 12 м кезінде оттық аймағындағы көміртек тотығының концентрациясы OFA 9,4 м жағдайымен салыстырғанда төмен екенін және орташа шамамен 0.002 кг/кг екенін байқауымызға болады. Алайда қазандықтан шыға берісте керісінше көрініс байқалады: мұнда OFA 9,4 м кезінде концентрация төмен болып, көміртек тотығының жоғары концентрациялы аймақтары байқалмайды және шамамен 0.0004 кг/кг-ге тең.



8-сурет – Қазандықтан шыға берістері CO концентрациясының таралуы [кг/кг] ( $x=7,1$ ):  
(а) Базалық режим; (б) OFA 8 м; (с) OFA 9,4 м; (д) OFA 12 м

9 – суреттегі талдау көрсеткендей, CO-ның ең жоғары концентрациялары оттық аймағының орталық жазықтығына жақын жерде байқалады, мұнда температура шамамен  $1000^{\circ}\text{C}$ -қа жетеді. Бұл аймақта көміртек құрамды отын мен тотықтырғыштың ( $\text{O}_2$ ) жоғары концентрациясы жану реакцияларының қарқынды жүруіне ықпал етеді. Нәтижесінде CO түзілуінің айқын түрі оттықтар орналасқан аймақтың дәл артқы тұсында байқалады.

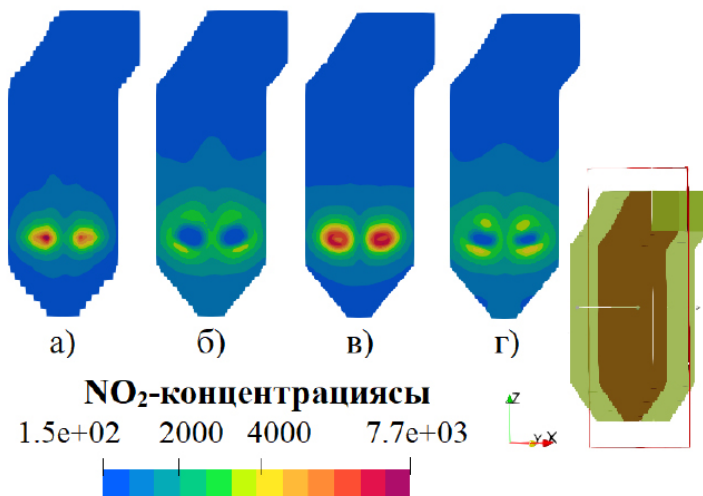
Түрлі OFA конфигурациялары үшін CO профильдерін салыстыру оттықтан шығу кезінде базалық режимде (OFA-сыз) CO-ның ең аз шоғырлануы байқалатынын көрсетеді. 12 м және 9.4 м биіктікте орналасқан OFA форсункаларын пайдалану кезінде CO-ның біршама жоғары қалдық концентрациялары шоғырлануы тіркелді, бұл жалыннан кейінгі аймақта толық жанбауды көрсетеді. Мұндай үрдіс OFA технологиясы  $\text{NO}_x$  шығарындыларын төмендету тиімділігінің артуына қарамастан, егер форсункаларды орнату биіктігі мен араласу шарттары қалыпты таңдалмаса, CO тотығу толықтығын аздап азайтуы мүмкін екенін көрсетеді.



9-сурет – CO концентрациясының биіктік бойынша таралуы

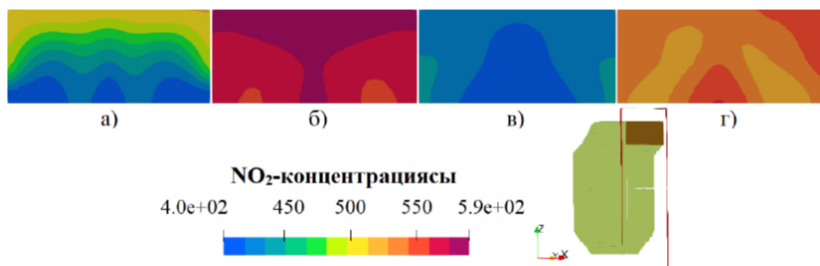
CFD модельдеу және визуализация нәтижелерін талдау азот оксидінің ( $\text{NO}_x$ ) бастапқы түзілу аймағы жоғары температура мен жоғары қарқынды құйын ағындарының аймақтарына сәйкес келетінін көрсетеді. Зерттелген ВКЗ-75 қазандық пешінде бұл аймақ оттық аймағының жанында орналасқан ( $z \approx 4,0$  м). Отынды ауа қоспасынан туындайтын күшті турбуленттілік отын мен тотықтырғыштың белсенді араласуына ықпал етеді, ал жалынның өзек температурасы ( $\sim 1000^\circ\text{C}$ )  $\text{NO}_x$  түзілуіне қолайлы жағдайлар жасайды. Осылайша, бұл аймақ жылулық және отынмен байланысты азот оксидтерінің негізгі көзі болып табылады.

OFA инжекторларының орналасуының әртүрлі конфигурациялары кезінде көлденең қимадағы шоғырлану аудандарын салыстырғанда (13-сурет) ең төменгі концентрация мәндері 8 м және 12 м OFA орнату биіктіктерінде байқалатынын көрсетеді, мұндағы қыздырғыш аймағындағы  $\text{NO}_2$  мәні шамамен  $600 \text{ мг/Нм}^3$  құрайды.



10-сурет – Жану камерасының көлденең қимасындағы NO<sub>2</sub> концентрациясы [мг/Нм<sup>3</sup>] (y = 3.3) (a) базалық режим; (b) OFA 8 м; (c) OFA 9.4 м; (d) OFA 12 м

Жану камерасының шығысында азот диоксидінің орташа концентрациясы OFA инжекторын орнату биіктігіне айтарлықтай байланысты (11 - сурет). NO<sub>2</sub> шығысының ең төменгі мәндері 9,4 м OFA биіктігінде байқалады, бұл басқа конфигурация нұсқаларымен салыстырғанда NO<sub>x</sub> шығарындыларының ең тиімді төмендеуін көрсетеді.



11-сурет – Жану камерасының шыға берісіндегі NO<sub>2</sub> концентрациясы [мг/Нм<sup>3</sup>] (y = 3.3) (a) базалық режим; (b) OFA 8 м; (c) OFA 9,4 м; (d) OFA 12 м

$\text{NO}_x$ -ның ең жоғары концентрациясы отын азотымен (Қарағанды көміріндегі мөлшері 1,21 %) және ауадағы азотпен (79 %  $\text{N}_2$ ) байланысты. Қатты отынның жануы кезінде азот оксидтері екі кезеңде түзіледі:

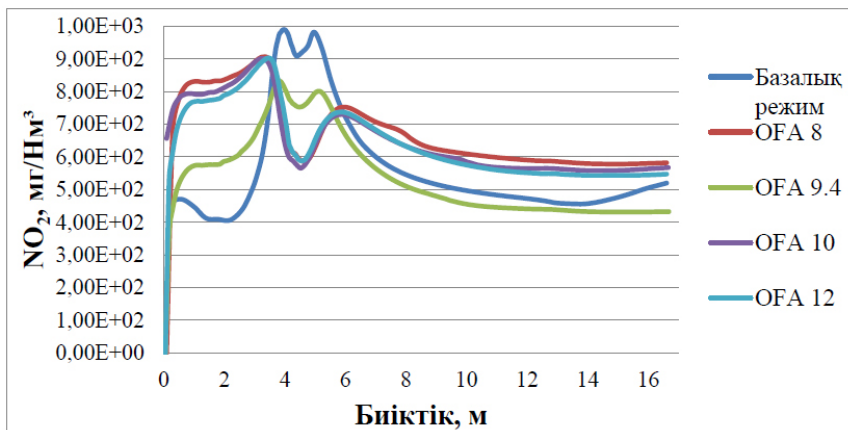
– ұшқыш заттармен байланысқан азоттың бір бөлігі жану кезінде бөлініп,  $\text{NO}$ -ға айналады;

– көміртегі қалдығына (қокс) байланысқан қалған азот көміртегі бөлшегінің жануы кезінде  $\text{NO}$  түзеді.

Бұл механизмдердің салыстырмалы үлесі отын сипаттамаларымен, атап айтқанда, ұшқыш заттардың үлесімен және деволатизация процесінің белсендіру энергиясымен анықталады.

10-12 суреттерде көрсетілгендей, температураның төмендеуіне және жоғарғы қабаттардағы белсенді азот қосылыстары мен оттегінің мөлшерінің азаюына байланысты пештің биіктігінің артуымен  $\text{NO}_x$  концентрациясы біртіндеп төмендейді. Бұл екі фактор да биіктіктің артуымен азот оксидінің түзілу жылдамдығының төмендеуіне ықпал етеді.

OFA берудің әртүрлі конфигурациялары кезінде  $\text{NO}_x$  бейіндерін салыстырмалы талдау, оттықтан шыға берістегі азот оксидтерінің ең аз шоғырлануы 9,4 м биіктікте форсункаларды орнату кезінде қол жеткізілетінін көрсетеді. Бұл биіктік отынның тұрақты және толық жануын сақтай отырып,  $\text{NO}_x$  шығарындыларын барынша азайту тұрғысынан OFA форсункаларын орналастыруда ең тиімді екеніне куәлік етеді.



12-сурет –  $\text{NO}_2$  концентрациясының биіктік бойынша таралуы

Жанудың бес режимі зерттелді: базалық (OFA-сыз) және 8, 9,4, 10 және 12 метр биіктікте орнатылған екінші реттік ауа форсункалары бар нұсқалар. Бұл деректер 2-кестеде келтірілген. Барлық OFA конфигурацияларында екінші реттік ауаның үлесі оттыққа берілетін жалпы ауаның 18%-ын құрады.

2-кесте – Жану камерасының шығысындағы концентрациялардың сипаттамалық статистикасы

	CO, [кг/кг]	CO <sub>2</sub> , [кг/кг]	SO <sub>2</sub> , [кг/кг]	Температура, [°C]	NO <sub>2</sub> , [мг/Нм <sup>3</sup> ]	NO, [мг/Нм <sup>3</sup> ]
OFA 12	4.34×10 <sup>-4</sup>	13.97×10 <sup>-2</sup>	1.32×10 <sup>-3</sup>	864.64	534.62	348.70
OFA 10	4.86×10 <sup>-4</sup>	13.67×10 <sup>-2</sup>	1.30×10 <sup>-3</sup>	846.28	549.30	358.27
OFA 9.4	4.68×10 <sup>-4</sup>	14.59 ×10 <sup>-2</sup>	1.37×10 <sup>-3</sup>	862.51	424.22	276.69
OFA 8	5.85×10 <sup>-4</sup>	13.63×10 <sup>-2</sup>	1.29 x 10 <sup>-3</sup>	851.65	571.30	372.62
Базалық режим	3.74×10 <sup>-4</sup>	15.62×10 <sup>-2</sup>	1.44 x 10 <sup>-3</sup>	1188.25	564.34	339.48

Форсунканы 9,4 м биіктікте орнатуда NO<sub>x</sub> концентрациясы 564,34-тен 424,22 мг/Нм<sup>3</sup>-ге дейін, ал CO<sub>2</sub> концентрациясы 15,62×10<sup>-2</sup>-ден 14,59×10<sup>-2</sup> кг/кг-ға дейін төмендеді. Осы кезде CO концентрациясы 3,74×10<sup>-4</sup>-тен 4,68×10<sup>-4</sup> кг/кг-ға дейін өсті, ал пайдаланылған газдың температурасы шамамен 325 °C-қа төмендеді. SO<sub>2</sub> концентрациясы барлық режимдерде стандартты шектерде қалды.

Бұл нәтижелер форсунканы 9,4 м биіктікте орнату ең тиімді екенін көрсетіп, ауа араласуы мен газдың жану аймағында болу уақытының оңтайлы тепе-теңдігін қамтамасыз етеді. OFA 8 м кезінде CO<sub>2</sub> жануы біршама толығырақ болғанына қарамастан, бұл NO<sub>x</sub> шығарындыларының артуымен қатар жүрді. OFA 12 м кезінде жану аймағының ішкі аумағына ауаның жеткіліксіз енуінен тиімділік төмендеді.

Өңдеу үшін CFD нәтижелерінен алынған және ParaView бағдарламасындағы бойлық және көлденең қималар (жану аймағы, OFA аймағы және оттықтың шығысы) көрсетілген температура және газ концентрациясы өрістері (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>) пайдаланылды.

### Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады (грант №BR28713563).

### Қорытынды

Күлділігі жоғары көмірді жағу кезіндегі OFA-ның квазистабильді күйінің CFD талдауы нәтижесінде, 9,4 м форсунканы орнату биіктігінде OFA форсункаларына 18 % ауа берілуі төмендегені қамтамасыз ететіні анықталды:

- NO<sub>x</sub> 24,83 %-ға азаюы;
- CO<sub>2</sub> 6,58 %-ға артуы және жану тиімділігінің артуы;
- шығарындылардың ұлттық стандарттарға сәйкестігі;
- қазандықтың жылу тиімділігін сақтау немесе жақсарту.

Айта кетер болсақ, тек CO концентрациясын бағалаған кезде, 12 м OFA нұсқасы ең жақсы нәтижені көрсетеді, оттықтың шыға берісіндегі CO шығарындылары төмен. Сонымен қатар, 8 м OFA нұсқасы CO<sub>2</sub> концентрациясының біршама жоғары екенін көрсетті, бұл толық жануды көрсетеді. Дегенмен, биіктік нұсқалары (8–12 м) арасындағы айырмашылықтар аз және пайдалануға рұқсат етілген ауытқу шегіне сәйкес келеді.

Қоршаған орта тұрғысынан алғанда, азот оксидтері (NO<sub>x</sub>) қатаң ережелерге және олардың ауа сапасы мен адам денсаулығына әсеріне байланысты ең маңызды ластаушы заттар болып қала береді. Осыған байланысты 9,4 м OFA конфигурациясы ең жақсы нәтижелерді көрсетті, тұрақты жануды сақтай отырып, NO<sub>x</sub> шығарындыларын айтарлықтай азайтты. Бұл нұсқа зерттелген барлық режимдер арасында ластаушы заттарды азайту мен оттықтың оңтайлы жұмысы арасындағы ең теңгерімді және тиімді шешім болып табылады.

Алынған нәтижелер ВКЗ-75 қазандықтарын Over Fire Air (OFA) технологиясын қолдана отырып жаңғыртудың әлеуетін растайды және Қазақстандағы жылу электр станцияларында автоматты бақылау жүйелерін (АМЖ) енгізуде қолдануға мүмкіндік береді.

### Пайдаланылған деректер тізімі

1 International Energy Agency. Statistical Review of World Energy 2024 [Текст]. – Paris : IEA, 2025.

2 KEGOC JSC. Годовой отчёт 2023 [текст]. – Астана : KEGOC, 2024. – URL: <https://ar2023.kegoc.kz/en/download/electricity-balance>.

3 Ministry of Ecology, Geology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan. Кодекс «Об охране окружающей среды» [Текст]. – Астана, 2021.

4 Samruk Energy. Годовой отчёт 2023 [Текст]. – Астана : Samruk Energy, 2024.

5 Ember. Global Electricity Review 2025 [Текст]. – London : Ember, 2025. – URL: <https://ember-climate.org/>

6 Агентство по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан. Энергетическая статистика 2024 [Текст]. – Астана : Бюро национальной статистики, 2024. – URL: <https://stat.gov.kz/en/industries/business-statistics/stat-energy/>

7 Zhou, H., Cen, K., Fan, J. Modeling and optimization of the NOx emission characteristics of a tangentially fired boiler with artificial neural networks // Energy. – Vol. 29, Issue 1, 2004. – P. 167-183. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2003.08.004>.

8 Li, Z., Miao, Zh., Zhou, Y., Wen, Sh., Li, J. Influence of increased primary air ratio on boiler performance in a 660 MW brown coal boiler // Energy. – Vol. 152, 2018. – P. 804–817. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.001>.

9 Jiang, Y., Li, X., Chen, Z., Wang, X. Optimization of operating conditions to achieve combustion stability and reduce NOx emission at half-load for a 550-MW tangentially fired pulverized coal boiler. // Fuel. – 2021. – № 306. – P. 121727. – <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121727>.

10 Zhou, K., Liu, J., Chen, L., Zhang, X., Wang, Y. Numerical research on combined OFA and FGR for boiler emissions [Текст] // Energies. – 2020. – Vol. 13, No. 3. – P. 725. – <https://doi.org/10.3390/en13030725>.

11 Messerle, V. E., Askarova, A. S., Bolegenova, S. A. Heat and mass transfer in BKZ-75 combustion chamber with OFA [Текст] // Thermophysics and Aeromechanics. – 2019. – Vol. 26, No. 2. – P. 295–311. – <https://doi.org/10.1134/S0869864319020033>.

12 Askarova, A. S., Bolegenova, S. A., Messerle, V. E. 3D modeling of combustion processes for solid fuels in industrial boilers [Текст] // Energies. – 2021. – Vol. 14, No. 5. – P. 1236. – <https://doi.org/10.3390/en14051236>.

13 Bolegenova, S., Askarova, A., Georgiev, A., Nugymanova, A., Maximov, V., Bolegenova, S., Adil'bayev, N. Staged supply of fuel and air to the combustion chamber to reduce emissions of harmful substances // Energy. – 2024. – Vol. 293, – No130622. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130622>.

14 Bolegenova, S., Askarova, A., Georgiev, A., Nugymanova, A., Maximov, V., Bolegenova, S., Mamedov, B. The use of plasma technologies to optimize fuel combustion processes and reduce emissions of harmful substances // Energy. – 2023. – Vol. 277. – No 127635. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127635>

15 Askarova, A., Georgiev, A., Bolegenova, S., Beketayeva, M., Maximov, V., Bolegenova, S. Computational modeling of pollutants in furnaces of pulverized coal boilers of the republic of Kazakhstan. // Energy. – 2022. – Vol. 258. – No 124826. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124826>

16 Askarova, A., Safarik. – P., Bolegenova, S., Nugymanova, A., Maximov, V., Askarov, N., Bolegenova, S. Using Plasma Activation to

Optimize the Combustion Process and Minimize Harmful Emissions. // Chemical Engineering and Technology. – 2021. – Vol. 44, Issue 11. – P. 1970 – 1977.

## References

1 International Energy Agency. Statistical Review of World Energy 2024 [Текст]. – Paris : IEA, 2025.

2 KEGOC JSC. Godovoj otchyot 2023 [Annual report 2023] [Text]. – Astana : KEGOC, 2024. – URL : <https://ar2023.kegoc.kz/en/download/electricity-balance>.

3 Ministry of Ecology, Geology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan. Kodeks «Ob okhrane okruzhayushchej sredy» [Environmental Protection Code] [Text]. – Astana, 2021.

4 Samruk Energy. Godovoj otchyot 2023 [Annual report 2023] [Text]. – Astana : Samruk Energy, 2024.

5 Ember. Global Electricity Review 2025 [Текст]. – London : Ember, 2025. – URL: <https://ember-climate.org/>

6 Agentstvo po strategicheskomu planirovaniyu i reformam Respubliki Kazakhstan. [Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan] Energeticheskaya statistika [Energy statistics] 2024 [Text]. – Astana : Byuro natsional'noj statistiki [Bureau of National Statistics], 2024. – URL: <https://stat.gov.kz/en/industries/business-statistics/stat-energy>

7 **Zhou, H., Cen, K., Fan, J.** Modeling and optimization of the NOx emission characteristics of a tangentially fired boiler with artificial neural networks // Energy. – Vol. 29, Issue 1, 2004. – P. 167–183. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2003.08.004>.

8 **Li, Z., Miao, Zh., Zhou, Y., Wen, Sh., Li, J.** Influence of increased primary air ratio on boiler performance in a 660 MW brown coal boiler // Energy. – Vol. 152, 2018. – P. 804-817. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.001>.

9 **Jiang, Y., Li, X., Chen, Z., Wang, X.** Optimization of operating conditions to achieve combustion stability and reduce NOx emission at half-load for a 550-MW tangentially fired pulverized coal boiler. // Fuel. – 2021. – № 306. – P. 121727. – <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121727>.

10 **Zhou, K., Liu, J., Chen, L., Zhang, X., Wang, Y.** Numerical research on combined OFA and FGR for boiler emissions [Текст] // Energies. – 2020. – Vol. 13, No. 3. – P. 725. – <https://doi.org/10.3390/en13030725>.

11 **Messerle, V. E., Askarova, A. S., Bolegenova, S. A.** Heat and mass transfer in BKZ-75 combustion chamber with OFA [Текст] // Thermophysics and Aeromechanics. – 2019. – Vol. 26, No. 2. – P. 295–311. – <https://doi.org/10.1134/S0869864319020033>.

12 Askarova, A. S., Bolegenova, S. A., Messerle, V. E. 3D modeling of combustion processes for solid fuels in industrial boilers [Текст] // Energies. – 2021. – Vol. 14, No. 5. – P. 1236. – <https://doi.org/10.3390/en14051236>.

13 Bolegenova, S., Askarova, A., Georgiev, A., Nugymanova, A., Maximov, V., Bolegenova, S., Adil'bayev, N. Staged supply of fuel and air to the combustion chamber to reduce emissions of harmful substances// Energy. –2024. – Vol. 293, – No130622. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130622>.

14 Bolegenova, S., Askarova, A., Georgiev, A., Nugymanova, A., Maximov, V., Bolegenova, S., Mamedov, B. The use of plasma technologies to optimize fuel combustion processes and reduce emissions of harmful substances// Energy. – 2023. – Vol. 277. – No 127635. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127635>

15 Askarova, A., Georgiev, A., Bolegenova, S., Beketayeva, M., Maximov, V., Bolegenova, S. Computational modeling of pollutants in furnaces of pulverized coal boilers of the republic of Kazakhstan. // Energy. – 2022. – Vol. 258. – No 124826. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124826>

16 Askarova, A., Safarik, P., Bolegenova, S., Nugymanova, A., Maximov, V., Askarov, N., Bolegenova, S. Using Plasma Activation to Optimize the Combustion Process and Minimize Harmful Emissions. // Chemical Engineering and Technology. –2021. – Vol. 44, Issue 11. – P. 1970 – 1977.

28.10.25 ж. баспаға түсті.

20.01.26 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*A. C. Аскарова<sup>1</sup>, С. А. Болегенова<sup>2</sup>,  
В. Ю. Максимов<sup>3</sup>, \*Д. Д. Тоқтаров<sup>4</sup>*

<sup>1,2,3,4</sup>Казахский национальный университет имени аль-Фараби,  
Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 28.10.25.

Поступило с исправлениями 20.01.26.

Принято в печать 27.02.26.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫСОТЫ УСТАНОВКИ ФОРСУНОК ОФА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО СЖИГАНИЯ ВЫСОКОЗОЛЬНОГО УГЛЯ

*В работе представлены результаты численного исследования процессов ступенчатого сжигания пылеугольного топлива с подачей воздуха над пламенем (OFA-Over-Fire Air) в паровом котле*

*БКЗ-75-39ФБ, работающем на казахстанском высокозольном угле Карагандинского бассейна. Моделирование выполнено в пакете FloREAN с использованием модели турбулентности RANS k-ε и шестипоточной модели. Исследовано пять режимов работы: базовый (без OFA) и четыре варианта с установкой форсунок на высотах 8,0; 9,4; 10,0 и 12,0 м при отношении воздуха в инжекторах и горелочных устройствах 18:82. Постобработка результатов в ParaView позволила получить вертикальные профили и на выходе котла, температур и концентраций газов (CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>) и провести описательный статистический анализ. Показано, что размещение форсунок OFA на высоте 9,4 м обеспечивает оптимальное соотношение между полнотой сгорания и снижением загрязняющих выбросов: концентрация NO<sub>x</sub> (NO + NO<sub>2</sub>) на выходе из точки снижается с 564,34 до 424,22 мг/Нм<sup>3</sup>, массовая доля CO<sub>2</sub> уменьшается с 0,1562 до 0,1459 кг/кг, при этом CO незначительно возрастает, а температура на выходе падает примерно на 325 °С. Выбросы SO<sub>2</sub> во всех режимах остаются в пределах нормативов Республики Казахстан. Полученные результаты подтверждают, что внедрение технологии OFA с подачей 18 % воздуха в форсунки и высотой установки ≈ 9,4 м позволяет снизить выбросы NO<sub>x</sub> и CO<sub>2</sub> в котлах типа БКЗ-75 без снижения тепловой мощности и может быть рекомендовано для теплоэлектроцентралей Казахстана.*

*Ключевые слова: CFD-моделирование, котёл БКЗ-75, пылеугольное топливо, технология OFA, снижение NO<sub>x</sub>, оптимизация горения, выбросы дымовых газов.*

*A. S. Askarova<sup>1</sup>, S. A. Bolegenova<sup>2</sup>,  
V. Yu. Maximov<sup>3</sup>, \*D. D. Toktarov<sup>4</sup>*  
*1,2,3,4al-Farabi Kazakh National University,  
Republic of Kazakhstan, Almaty.*

*Received 28.10.25.*

*Received in revised form 20.01.26.*

*Accepted for publication 27.02.26.*

## **OPTIMIZATION OF OFA INJECTOR HEIGHT FOR EFFICIENT HIGH-ASH COAL COMBUSTION**

*The paper presents the results of a numerical study of staged combustion processes of pulverized coal with overfire air (OFA) supply in the BKZ-75-39FB steam boiler operating on high-ash Kazakh coal from*

*the Karaganda Basin. The modeling was carried out in the FloREAN software package using the RANS  $k-\epsilon$  turbulence model and a six-stream combustion model. Five operating modes were investigated: a baseline case (without OFA) and four variants with injectors installed at heights of 8.0, 9.4, 10.0, and 12.0 m, with the air distribution ratio between injectors and burners of 18:82. Post-processing of results in ParaView provided vertical and outlet profiles of temperature and gas concentrations ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ ) and enabled descriptive statistical analysis. It was shown that installing the OFA injectors at 9.4 m provides the optimal balance between complete combustion and pollutant reduction: the  $NO_x$  ( $NO + NO_2$ ) concentration at the boiler outlet decreases from 564.34 to 424.22 mg/Nm<sup>3</sup>, the  $CO_2$  mass fraction drops from 0.1562 to 0.1459 kg/kg, while  $CO$  slightly increases, and the outlet temperature decreases by approximately 325 °C.  $SO_2$  emissions remain within the regulatory limits of the Republic of Kazakhstan under all conditions. The obtained results confirm that implementing the OFA technology with 18 % air supply to injectors and an installation height of about 9.4 m can effectively reduce  $NO_x$  and  $CO_2$  emissions in BKZ-75-type boilers without compromising thermal performance and can be recommended for Kazakhstani combined heat and power plants.*

*Keywords: CFD modeling, BKZ-75 boiler, pulverized coal, OFA technology,  $NO_x$  reduction, combustion optimization, flue gas emissions.*

Теруге 13.03.2026 ж. жіберілді. Басуға 31.03.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

28.54 Мб RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: З. Ж. Шокубаева

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4523

Сдано в набор 13.03.2026 г. Подписано в печать 31.03.2023 г.

Электронное издание

28.54 Мб RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: З. Ж. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4523

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: [kereku@tou.edu.kz](mailto:kereku@tou.edu.kz)

[www.vestnik-energy.tou.edu.kz](http://www.vestnik-energy.tou.edu.kz)