

Асқарова Ә.С., Бөлегенова С.А.,  
Бекмұхамет А., Мұқашева Г.К.,  
Бердаuletova Ж.

**Алматы ЖЭО-2-нің БКЗ-420  
жану камерасындағы шаң  
көмірлі алаудың жануын  
компьютерлік модельдеу**

Берілген мақала атқаратын жылу электр станциясының өндірістік қазандықтарының жану камерасында қатты отынды тозаңды түрінде жағу кезінде орын алатын жылу массатасымалдау процестерін зерттеуге арналған. Әрі зерттеу мәселесінің физика-математикалық, химиялық модельдерімен қатар алға қойылған есептің алгоритмі және сандық әдісі жасақталған. Алматы ЖЭО 2-нің БКЗ-420 қазандығының техникалық сипаттамаларын ескере отырып жану қазандығының геометриялық моделі зерттелген. Сонымен қатар Навье-Стокстың үш өлшемді теңдеулерінің, химиялық реакциялардың кинетикасы ескеріліп жылу мен масса тасымалданудың, турбуленттілік пен ортаның көпфазалылығы, конвективті және радиациялық жылуалмасу теңдеулері негізінде камераның барлық көлемі бойында, әрі оның негізгі көлденең бойлық қималарында сондай-ақ шығыс аймағында ағыстардың аэродинамикалық, жылулық және концентрациялық сипаттамалары анықталды. Жану қазандығының құрылымдық және геометриялық параметрлерінің жылу масса тасымалы процесіне әсері зерттеліп, күлділігі жоғары Екібастұз көмірін БКЗ-420 жану қазандығында тиімді жағу әдісі ұсынылған.

**Түйін сөздер:** турбуленттік жану, отын, алау, жану камерасы, ағыс аэродинамикасы.

Askarova A.S., Bolegenova S.A.,  
Bekmukhamet A., Mukasheva G.K.,  
Berdavletova Zh.

**Mathematical simulation  
of burning coal-dust flame  
in the boiler furnace BKZ-420  
Almaty TPC-2**

This article is devoted to the study of heat and mass transfer processes taking place in the combustion chamber of the boiler operating industrial CHP plants by burning solid fuel in it pulverized. Created physical-mathematical, chemical model of the problem, an algorithm developed by the task and a numerical method for research. Based on 3-dimensional Navier-Stokes equations, heat and mass transfer with the kinetics of chemical reactions, turbulence and multiphase media, convective and radiative heat transfer revealed aerodynamic, thermal and concentration flow characteristics over the entire volume of the combustion chamber, in its main sections and output therefrom. The influence of structural and geometric parameters of the combustion chamber on the characteristics of heat and mass transfer, and proposed the best method of burning high-ash Ekibastuz coal in the combustion chamber of the boiler BKZ-420

**Key words:** turbulent combustion, fuel, torch, aerodynamic flow.

Асқарова А.С., Бөлегенова С.А.,  
Бекмұхамет А., Мұқашева Г.К.,  
Бердаuletova Ж.

**Математическое  
моделирование горения  
пылеугольного факела в топке  
котла БКЗ-420 Алматинской  
ТЭЦ-2**

Данная статья посвящена изучению процессов теплообмена, имеющих место в топочной камере промышленного котла действующей ТЭЦ, при сжигании в ней твердого топлива в пылевидном состоянии. Созданы физико-математическая, химическая модели задачи, разработаны алгоритм поставленной задачи и численный метод для проведения исследований. На основе 3-мерных уравнений Навье-Стокса, переноса тепла и массы с учетом кинетики химических реакций, турбулентности и многофазности среды, конвективного и радиационного теплообмена выявлены аэродинамические, тепловые и концентрационные характеристики течения по всему объему топочной камеры, в ее основных сечениях и на выходе из нее. Исследовано влияние конструктивных и геометрических параметров топочной камеры на характеристики теплообмена и предложен оптимальный метод сжигания высокозольного экибастузского угля в топочной камере котла БКЗ-420.

**Ключевые слова:** турбулентное горение, топливо, факел, аэродинамика течения.

**АЛМАТЫ ЖЭО-2-  
НІҢ БКЗ-420 ЖАНУ  
КАМЕРАСЫНДАҒЫ  
ШАҢ КӨМІРЛІ  
АЛАУДЫҢ ЖАНУЫН  
КОМПЬЮТЕРЛІК  
МОДЕЛЬДЕУ**

**Кіріспе**

Қазақстанның барлық дерлік қалаларының атмосферасы көптеген зиянды заттармен ластанған, бұл мәселенің ең өзекті тұсы Алматы қаласына тиесілі, мұнда ластанудың ең үлкен деңгейі автотранспорттың, өндірістік орындардың зиянды зат тектерінің шығарылатын жалпы мөлшеріне және оған қоса, қаланың ерекше географиялық орналасу жағдайына байланысты. Ал жылуэнергетикалық көздерден шығарылатын зиянды заттардың негізгі үлесі ірі орталықтанған жылумен қамтамасыз етуші мекемелерге тиісті: түрлі деңгейдегі ЖЭС, СЭС, аудандық жылу беру жүйелері және т.б.

Қазақстанда электр энергиясының 85% пайызы дерлік жылу электр станцияларынан өндіріледі, ал онда негізгі жанатын отын түрі көмір болып табылады. Осы ЖЭС-те жағылатын көмірдің 80% пайызы – төменгі сұрыпты және күлділігі жоғары (40% пайыздан жоғары) Екібастұз бассейнінен ашық әдіспен алынатын арзан көмір.

Мұндай күлділігі жоғары көмірді қолдану бірқатар қиындықтарды тудырады, мысалы тұрақсыз жану, қоқыстану мәселесі, сонымен қатар қоршаған ауа қабатын күл қалдықтарынан, көміртегі тотығынан (CO), азот қостотығынан (NO<sub>x</sub>), күкірт қостотығынан (SO<sub>2</sub> және SO<sub>3</sub>), көмірсутектерден, ванадий қоспаларынан (негізінен ванадий пентаксиді) және т.б. -дан қорғау. Екібастұздық көмірді қолданатын бу генераторларын талдау отынның күлділігінің жоғары болуы, қазандықпен жанарғылардың конструкциясына қосымша талаптар қойылуы қажеттігін аңғартады және камерада жану заңдылықтарына айтарлықтай әсер ететінін айқындайды.

Өткен уақытта энергетиканың алдыңғы қатарлы мәселесі тек энергия өндіру болса, қазіргі таңда зиянды зат тектердің бөлінуін де қатаң сақтап отыру керек және бір мезетте құрылғыны экономиялық жағынан тиімді пайдалану қажет. Өте маңызды мәселелердің бірі көмірді «таза» жағу процесін ұйымдастыру. Зиянды қалдықтарды төмендету үшін алғашқы шара: алауда зиянды заттардың бөлінуін басып отыратын арнайы оттық режимі. Екінші текті шаралар да бар: жұмысшы газды тазалау жүйесін іске қосу.

Физикалық моделдер арқылы осы аталған бірінші және екінші дәрежелі шаралар арқылы зиянды заттардың мөлшерін азайту әдістерінің жаңа тәсілін құру бір жағынан физикалық тәжірибеге қажетті үлкен шығындармен, ал екіншіден, мұндай жоба жеке бір мәселелерді шешуге қажетті ұсыныстарды ғана бере алады, себебі жану камерасында және түгіндікте параллель жүзеге асушы барлық процестерді масштаб бойынша кіші құрылғыларда физикалық моделдеу мүмкін емес. Бұл мәселе тек жүйелі талдау, физикалық және химиялық моделдеу нәтижесінде ғана шешіле алады.

Қазіргі таңда жылу алмасуды, турбулентті жануды және турбулентті ағыстарды есептеу үшін түрлі математикалық есептеулер құрылды. Одан басқа есептеуге мүмкіндігі мол есептеуіш бағдарламалық кешендер жасақталған (FLOREAN, Ansys Fluent және басқалар). Аталмыш бағдарламалар көмегімен ауқымды аймақты жүйелерде есептеулерді параллель жүргізіп тиімді және жылдам есептеу жүргізуге болады. Алайда сандық есептеу нәтижесі эксперименттен алынған нәтижемен өзара сәйкес болуы маңызды мәселелердің бірі. Бұл жұмыста турбулентті жанған алауға талап етілген заманауи есептеуші пәкәттік бағдарлама көмегімен дәл немесе нақты есептеу жүргіздік.

Осы мақсатқа жету үшін нақты және бөліктік негізгі физикалық шаманың өлшем нәтижелері бар жоғары дәлдікті ағынды диффузиялық алаудың моделдік есептеуін қарастырдық. Турбулентті және жану модельдерінің алынған өлшем нәтижелерін салыстыру арқылы ұсынылған нәтижемен талапқа сай келмейтіндігі шығады. Берілген жұмысты есептейтін құрал FLOREAN бағдарламасы болып табылады. Нақты геометрия аймағында жылу масса тасымалдануының модельденуіндегі физикалық-химиялық процесс практикалық пайдалануы кезіндегі бірден-бір қызықты және маңызды сұрақ болып табылады.

### Математикалық модель

Физика-химиялық процестер барысында жылумассатасымалды модельдеу үшін масса, импульс, энергия сынды шамалардың негізгі сақталу заңдары қолданылады. Физика-химиялық әрекеттесу барысында жылумассатасымал турбулентті қозғалыс пен химиялық процесс бірге жүріп жатқанда орындалады. Мұндай жағдайда әрекеттескіш қоспа компоненттерінің сақталу заңын, турбуленттілікті, ортаның көп фазалылығы хи-

миялық реакция мен қыздырылған ортадан шығатын жылуын ескерген жөн.

Аталып кеткен физикалық және химиялық құбылыстарды ескеріп барлық теңдеулерді жазып шығу үшін, бастапқыда бұл теңдеулерді қандайда бір субстанцияның  $\phi$  сақталу заңы ретінде жазу керек (масса, импульс, энергия, қоспа құраушылары).

Массаның сақталу заңы немесе үзіліссіздік теңдеуінің дифференциалдық түрі келесідей жазылады:

$$\underbrace{\frac{\partial \rho}{\partial t}}_I + \underbrace{\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i}}_{II} = 0 \quad (1)$$

Мұндағы бірінші мүше отынның стационар еместігін сипаттайды, ал екінші мүше конвективті тасымалды сипаттайды. Сығылмайтын сұйықтар үшін үзіліссіздік теңдеуі мына түрде беріледі:

Импульстің сақталу заңы немесе қозғалыс мөлшерінің теңдеуі келесідей өрнектеледі:

$$\underbrace{\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i}}_I + \underbrace{\frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j}}_{II} = - \underbrace{\frac{\partial p}{\partial x_i}}_{III} + \underbrace{\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}}_{IV} + \underbrace{\rho g_i}_V, \quad (2)$$

Әрекеттескіш турбулентті ағыстардағы энергия өзгерісі келесі процестердің себебінен болуы мүмкін: конвекция есебінен толық энергияның ағыны; молекулалық жылу тасымал есебінен толық энергияның ағыны; бақыланатын аймақ бетіне қысым күштерінің жұмысының әсері есебінен энергия өзгерісі; бақыланатын көлем бетіне үйкеліс күштерінің жұмысының әсері есебінен энергияның өзгерісі; көлемдік күштер жұмысының есебінен энергияның өзгерісі; жылулық сәулелену энергиясы есебінен немесе химиялық түрлену нәтижесінде энергияның жұтылуы және бөлінуі.

Жоғарыда нұсқалған есептерді ескеріп, энергия теңдеуін жалпылама мына түрде көрсетуге болады:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_{j'} h_{j'} J_{j'} + u_j (\tau_{ij})_{eff} \right) + S_h, \quad (3)$$

мұнда  $k_{eff}$  - эффективті жылуөткізгіштік, ол  $k_j + k_t$  суммасын береді (ламинарлы және турбулентті),  $J_{j'} - j'$  компонентасының диффузиялық ағыны.

Әрекеттескіш қоспа компоненттері үшін сақталу заңын жазу үшін массалық концентрация  $\tilde{N}_\beta$  деген түсінік енгіземіз:

$$\tilde{N}_\beta = \frac{\rho_\beta}{\rho}, \quad \sum_{\beta=1}^n \rho_\beta = \rho, \quad \sum_{\beta=1}^n \tilde{N}_\beta = 1.$$

Мұндай жағдайда субстанцияның сақталу заңы төмендегідей болады.

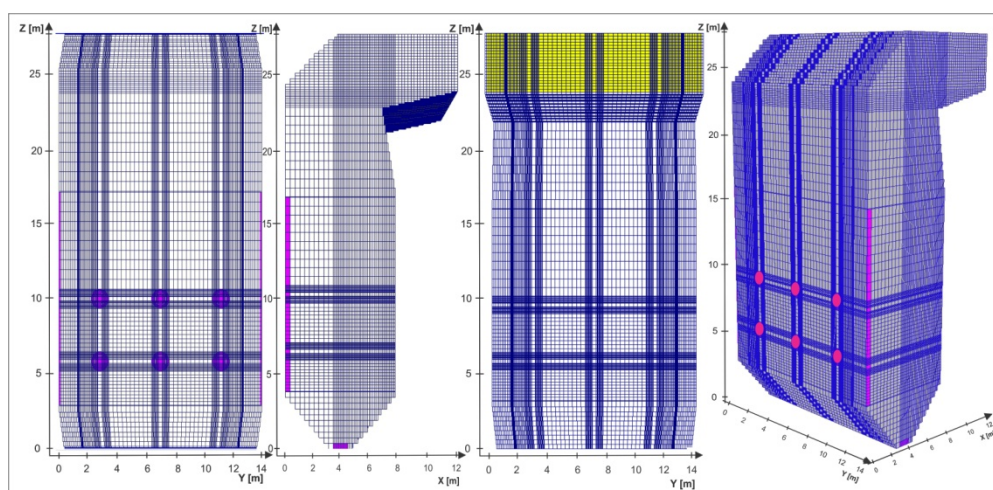
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{N}_\beta) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{N}_\beta u_i) + \frac{\partial j_i}{\partial x_i} + S_\beta \quad (4)$$

Зерттеу объектісі ретінде 420 т/сағ бу өндіру қуатына ие Алматы ЖЭО 2-нің БКЗ-420 қазандығының жану камерасы таңдап алынды. Е-420-13,8-560 БТ (БКЗ-420-140-7) қазандығы будың жоғары параметрлі жылутурбиналары арқылы жылу электр орталықтарында қыздырылған бу өндіру үшін Екібастұз көмірін жағу нәтижесінде жұмыс атқаруға бағытталған. БКЗ-420 жану камерасының кемшілігі – ыстық

ауа ағындарының жанарғының қарама-қарсы қабырғасына бір бағытта тікелей соғуы. Бұл қабырғаның күйюіне және кейіннен қазандық камера құрлымының бұзылуына алып келеді. Сол себепті Алматы ЖЭО 2-де негізгі режимде осы қабырға арқылы массалық шығыны 5 кг/с болатын салқын ауа беріледі. Біз осы негізгі нұсқаны моделдедік.

### Модельдеу нәтижелері

Төменде БКЗ-420 қазандығы жану камерасының жалпы пішіні көрсетілген. Сандық тәжірибені жүргізу үшін БКЗ-420 қазандығы жану камерасы бақылау көлемдеріне бөлінген (сурет 1). Сонымен қатар сандық зерттеу үшін бақылау көлем әдісі қолданылды, мұнда зерттелетін нысанның жану камерасы 871 594 бақылау торы ұяшықтарға бөлінді. Бұл өз кезегінде геометриялық модельді, сандық есептеулер мен нәтижелердің графикалық интерпретациясын жақсартуға мүмкіндік берді.



1-сурет – Алматы ЖЭО-2 БКЗ-420 қазандығының жалпы 3D түрі және оны бақылау көлемдеріне бөлінген сұлбасы келтірілген

Төменде жанарғыларға қарсы қабырғада орналасқан ойықтар арқылы қосымша ауаны берудің екі нұсқасы үшін Алматы ЖЭО 2-нің БКЗ-420 қазандығының жану камерасында Екібастұздық көмірінің жану процесін 3-D модельдеуінің нәтижелері көрсетілген.

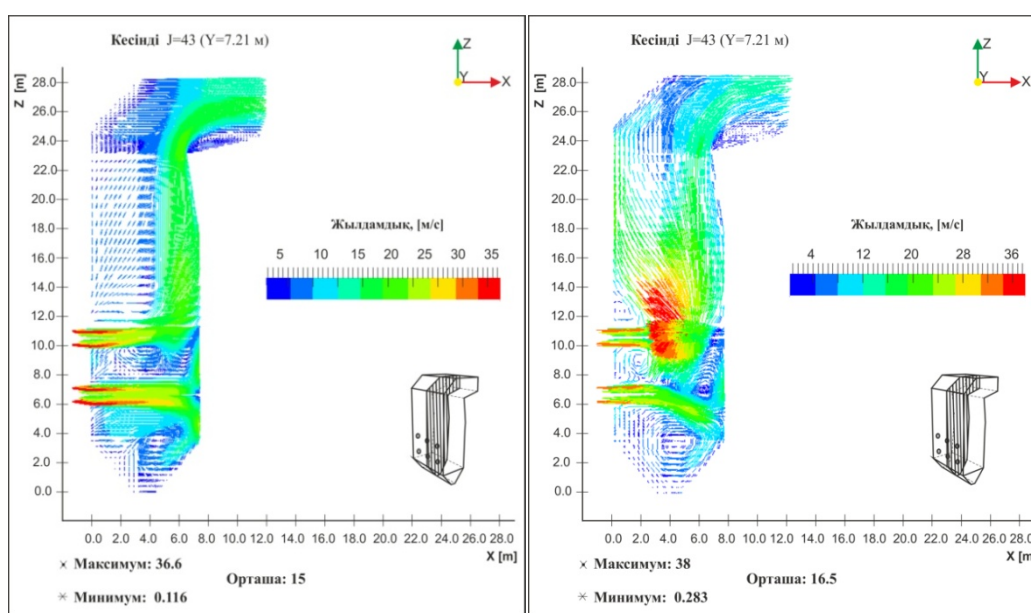
Алматы ЖЭО 2-де отынды жағу жанарғыға қарсы қабырғадағы жану камерасында ойық арқылы ауаның массалық шығынының мәні 5 кг/с болғанда жүргізіледі. Сонымен қатар зерттеу жұмысы барысында ЖЭО 2 үшін осы қосымша

ауа шығын екі есе артатын(10 кг/с) және ойықтар қазандықтың қабырғасына қатысты 45° бұрышпен орналасатын жаңа жұмыс режимі ұсынылды.

2-суретте жанарғыға қарсы қабырғадан саңылау арқылы қосымша берілетін ауаның массалық шығыны 5 кг/с (сурет 2 а) және 10 кг/с (сурет 2 б) болған кезде кездегі БКЗ-420 қазандығының (y=7.18м) бойлық қимасында толық жылдамдық векторының таралуы бейнеленген.

2-суретті талдай отырып төменгі жанарғылардан бағытталған ағындар қазандықтың қарсы қабырғасымен соқтығыса отырып, кері ағыс қалыптастыратындығын байқадық. Ағынның бір бөлігі салқындату аймағына бағыттала отырып төменгі жанарғының астыңғы бөлігінде құйынды ағыс туғызады. Ал ағынның келесі бір бөлігі

жоғарғы жанарғылар мен қосымша ауа беру саңылау орналасқан аймаққа бағыттала отырып, онда да ағынның құйындалуы туындайды. Жылдамдық ең жоғарғы мәні тозаңды отынды бүркітін жанарғылар мен қосымша ауамен қамтамасыз ететін саңылау орналасқан деңгейлерде орын алады.



а) 5 кг/с

б) 10 кг/с

2-сурет – Алматы ЖЭО-2 БКЗ-420 жану қазандығы камерасының ортанғы бойлық қимасы ( $y=7.18$  м) бойынша толық жылдамдық векторының үлестірілуі

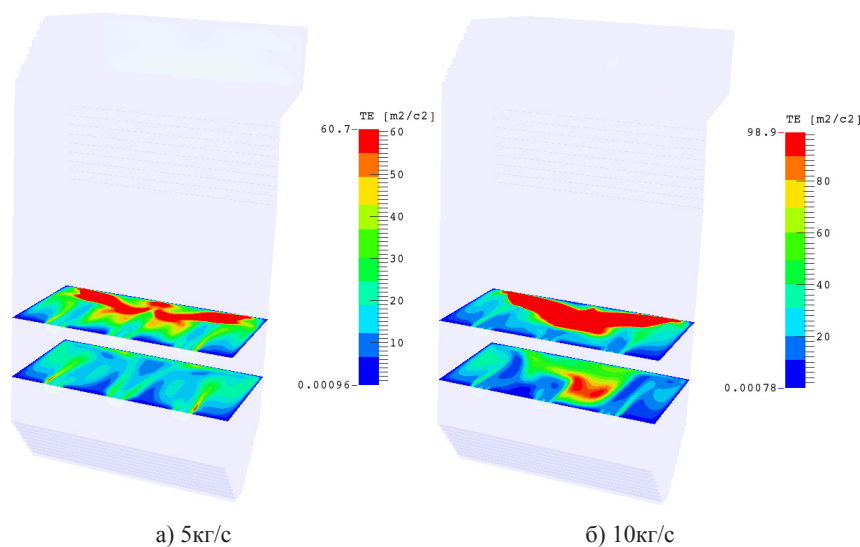
2а мен 2б суреттерін салыстыра отырып, жанарғыға қарсы қабырғада орналасқан саңылаулар арқылы берілетін ауаның массалық шығынының артуымен турбуленттіліктің де артатынын және жылдамдықтың максимал, минимал және орташа мәндері де артатынын байқауға болады. Жылдамдықтың максимал мәні бірінші жағдай (5 кг/с) үшін 36,6 м/с тең, ал екінші жағдай (10 кг/с) үшін – 38 м/с. Саңылау арқылы берілетін ауаның массалық шығыны 10 кг/с болғанда аэрокоспа ағыны мен ауа жоғарғы жанарғылардың төменгі және жоғары аумақтарда құйындар туғызады. Турбуленттік құйындардың пайда болуы тозаңды көмірлі отынның толық жануына ең жақсы жағдайлар туындатады.

Тозаңды көмірлі отынның үлкенірек өлшемдерін қолдану - көмірден тозаңды отындарды даярлау шығынын азайтады, сондай-ақ тасымалдауды және оларды жану камерасына жеткізуді азайтады, яғни бұдан экономикалық тиімділікті байқауға болады. Сонымен қатар, мұндай жану

процесін ұйымдастыру кезінде көмір бөлшектерін жағуды үдетуге бағытталған қосымша ауа беруші құрылғыларын орнатудың қажеттілігі болмайды, бұл кезде жылулық шығын артып, жану камерасынан атмосфераға бөлінетін зиянды шаңдыгазды ұшпалардың түзілуі артады.

3-суретте турбулентті ағыс аэродинамикасының турбуленттіліктің кинетикалық энергиясы  $k$  (Те) анықталған.

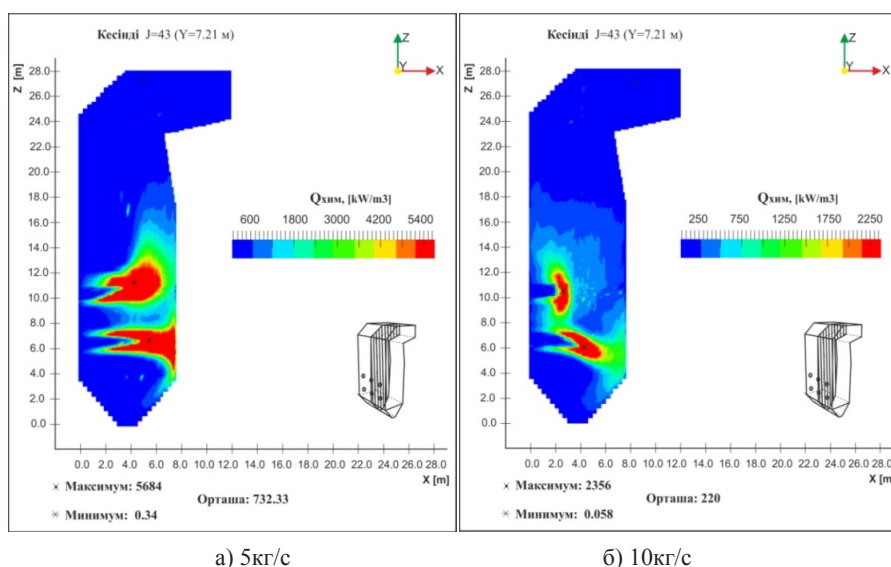
3-сурет арқылы турбуленттілік энергиясының  $k$  максимумдары екінші деңгейдегі жанарғыға қарама-қарсы орталық облыстарда анық көрінеді. Бұл облыста бір-біріне қарама-қарсы тангенциалды орналастырылған жанарғы құрылғыларынан тозаңды газды ағындардың соқтығысуынан пайда болу арқылы жану камерасының осы аумағында ағын бағыттарының максимал ауытқуы байқалып, осы жерде турбуленттіліктің жоғары деңгейі көрінеді. Ал бұл өз кезегінде турбулентті кинетикалық энергияның жоғары мәндерін қамтамасыз етеді.



3-сурет – Жанарғылардың жоғарғы және төменгі деңгей қималарындағы турбулентті энергияның үшөлшемді үлестірілуі

4-суретке талдау жүргізе отырып химиялық реакциялар арқылы бөлінетін жылудың ең үлкен мәні жану қазандығында отын мен тотықтырғыштың өз-ара әсерлесу аймағында жақсы байқалады, яғни жанарғылар орналасқан аумаққа жақын. Дәл осы аумақта жанғыш отын мен ауа оттегісінің араласуы максимал мәнге

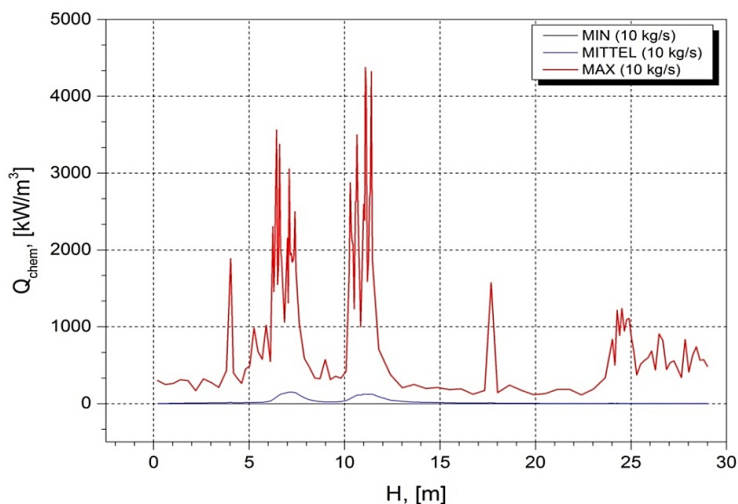
жетеді, ол турбулентті пульсациялардың және ағынның құйынды сипатта интенсивті араласуына байланысты болып оның барлығы көміртегінің тотығуы кезіндегі химиялық реакция жылдамдығының ұлғаюына, және осы уақытта энергияның максимал мөлшерінің бөлінуіне қолайлы жағдай жасайды.



4-сурет – Жану камерасының орталық бойлық тік қимасындағы (Y=7.21m) химиялық реакция энергиясының үлестірілуі

5-суретте жану камерасының биіктігі бойынша химиялық энергияның үлестірілуі көрсетілген. графиктен  $Q_{chem}$  екі максимум мәнге ие екенін байқауға болады, олар отын мен

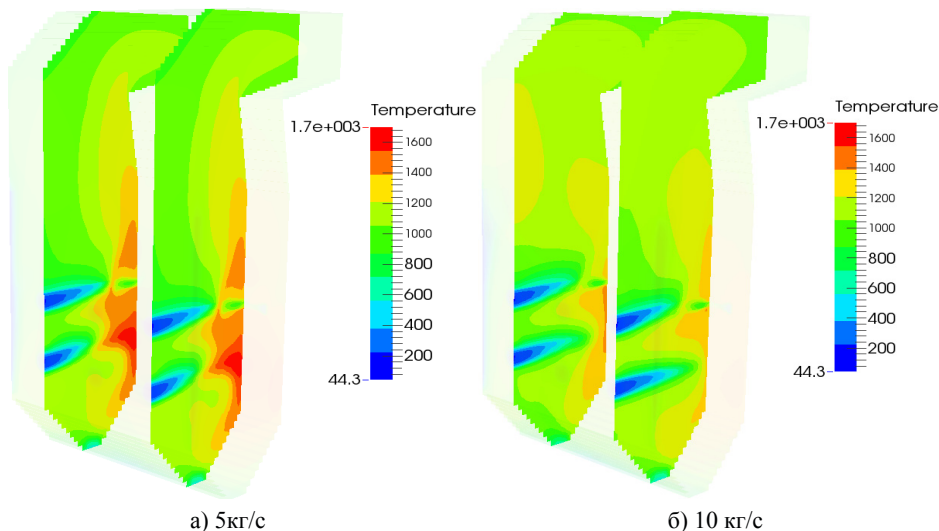
тотықтырғыш берілетін және химиялық әрекеттесуге түсетін заттардың концентрациясы максимал болатын жанарғы саңылауларының екі деңгейіне сәйкес келеді.



**5-сурет** – Саңылаудан берілетін қосымша ауаның массалық шығын мөлшері 5кг/с кезінде БКЗ-420 қазандығының жану камерасының биіктігі бойынша химиялық энергияның үлестірілуі

6-суретте жану камерасының жоғарғы және төменгі деңгейі шеткі жанарғылары облыстарында бойлық екі тік қималарында ( $Y1=2.95$  m және  $Y3=11.4775$  m) температураның үшөлшемді үлестірілуі көрсетілген. Мұнда саңылаудан берілетін қосымша ауа шығыны 5 кг/с болған кезде, температураның максимум мәндері төменгі деңгейдегі ( $Z=6.82$ m) жанарғыларға қа-

рама-қарсы орналасқан қазандық қабырғаларының маңында байқалады, ол аймақтағы температураның максимум мәні  $1740^{\circ}\text{C}$  тең. Ал саңылаудан берілетін қосымша ауа шығыны 10кг/с кезінде (сурет 7б) жанарғылардың қарама-қарсы қабырғаларындағы температура мәндері айтарлықтай төмендейді, шамамен  $350^{\circ}\text{C}$ -қа дейін кемиді.



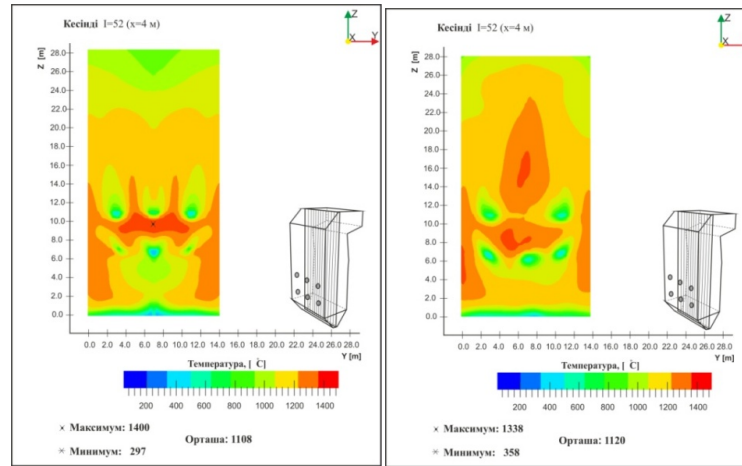
**6-сурет** – Жану камерасының екі шеткі жанарғылары бойынша бойлық тік қимасындағы ( $Y1=2.95$  m және  $Y3=11.4775$ m) температураларының үшөлшемді үлестірілуі

7-суретте  $X$  осінің ( $X=4.01$ m) бойлық тік қимасындағы температураның үлестірілуі келтірілген. Жанарғыларға қарама-қарсы қабыр-

ғадан саңылау арқылы енген ауаның аз массалық шығыны (5 кг/с) кезінде ыстық алаудың екі деңгейдегі жанарғылар арасындағы облыста

пайда болатынын байқауға болады (сурет 7а), ал қосымша берілген ауаның массалық шығын (10 кг/с) көп болған кезде температуралық

алау өріс жану камерасының ішкі кеңестік биіктігі бойынша жоғары қарай ығысады (сурет 7а).



а) 5кг/с

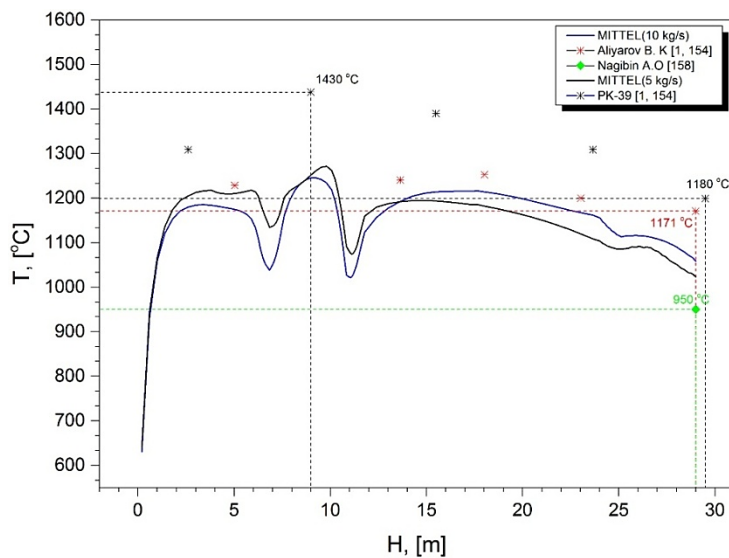
б) 10 кг/с

**7-сурет** – Қосымша ауаның массалық шығындары әр түрлі болғанда жану қазандығының бойлық тік қимасы  $X=4.01\text{m}$  аймағында температуралық өрістің үлестірілуі

Жоғарыда келтірілген мәліметтер саңылаудан берілетін қосымша ауаның екі түрлі массалық шығыны үшін жану қазандығының биіктігі бойынша температураның екі өлшемді графиктері 8-сурет арқылы сипатталады.

Суретке талдау жүргізе отырып, жану қазандығының биіктігі бойынша  $Z1=6.82\text{ m}$  және  $Z2=10.8\text{ m}$  қимада орналасқан суық

аэрокоспаны бүркітін жанарғы құрылғылары аймағында температура үлестірілуінің төменгі мәндері байқалады. Ал қосымша ауаның массалық шығыны 5кг/с тең болғанда жану қазандығының шығысында қосымша ауаның массалық шығыны 10 кг/с тең болған кезбен салыстырғанда температура мәні жоғары болады.



**8-сурет** – Жану қазандығы биіктігі бойынша орташа температура мәнінің үлестірілуі



### Қорытынды

Жану қазандығының биіктігі бойынша температураның орташа мәнінің үлестірілуіндегі минимум мәндердің жанарғылардың орналасу деңгейінде орын алу құбылысы, жанарғылар аймағында қазандықтағы жалпы температурадан әлдеқайда төмен болатын тозаңды отын мен

тотықтырғыш қоспасының сол аймақтан жану қазандық ішіне бүркілуімен түсіндіріледі. Сондай ақ жанарғылардың орналасу аймағында орташа температураның максимум мәндері де кездеседі, оның себебі жанарғылар орналасқан аймағындағы тотығыудың есебінен қазандықтың ішкі центір аймағында алау көзінің шоғырлануынан.

### References

1. Aliyarov B.K., Aliyarova M.B. Szhiganiye kazakhstanskikh ugley na TES i na krupnyk hкотel'nykh. - Almyty, 2012. -130s.
2. Yun A.A., Krylov B.A. Raschet i modelirovaniye turbulentykh techeniy s teploobmenom, smesheniyem, khimicheskimi reaktsiyami i dvukhfaznykh techeniy v programmnom komplekse Fastest-3D: Uchebnoye posobiye. - M.: Izd-vo MAI, 2007. – 116 s.
3. Askarova A., Bolegenova S., Gabitova Z., Bekmukhamet A., Ospanova Sh., Beketaeva M., Ergalieva A., Thermal characteristics at combustion of solid pulverized coal fuel in the furnace chamber of TPP// Materials of IV «Science, Technology and Higher Education» Conference, January 2014, Westwood, Canada 2014, -P. 323-330.