

Асқарова Ә.С.,  
Бөлегенова С.Ә.,  
Максимов В.Ю., Усербаев Б.Ж.,  
Нахипова Ф.

**БКЗ-420 қазандығының жану  
камерасындағы  
физика-химиялық процестерді  
математикалық модельдеу**

Askarova A.S.,  
Bolegenova S.A.,  
Maximov V.V., Userbaev B.Z.,  
Nahipova F.

**Mathematical modeling of  
physical and chemical processes  
in the combustion chamber of  
the boiler BKZ-420**

Асқарова А.С.,  
Болегенова С.А.,  
Максимов В.Ю., Усербаев Б.Ж.,  
Нахипова Ф.

**Математическое  
моделирование  
физико-химических процессов  
в камере сгорания котла  
БКЗ-420**

Бұл жұмыс БКЗ-420 өндірістік қазандықтарының жану камерасында қатты отынды тозаңды түрінде жағу кезінде орын алатын физика-химиялық процестерін зерттеуге арналған. Зерттеу барысында физика-химиялық процестердің математикалық моделімен қатар 2D және 3D модельдер қарастырылды. Сонымен қатар Навье-Стокстың үш өлшемді теңдеулерінің, химиялық реакциялардың кинетикасы ескеріле отырып, турбуленттілік пен ортаның екіфазалылығы теңдеулері негізінде жану камерасында орын алатын көлденең бойлық қималарында, шығыс аймағында, жандырғының аумағындағы ағыстардың аэродинамикалық және жылулық сипаттамалары анықталды. Қоршаған ортаның ластану дәрежесін төмендету және оны қалыпты жағдайда ұстап тұру әдістемесі қарастырылады. Алынған тәжірибелік есептеу нәтижелері ЖЭС орталықтардан алынған негізгі эксперимент нәтижелерімен салыстырылған.

**Түйін сөздер:** көмір, жану, энергетика, физика-химиялық процестер, энергетикалық құрылғы, тозаңды жандырғы, жану камерасы.

This work is dedicated to the study of physical and chemical processes during burning solid oil in the dust form in the combustion chamber of industrial boilers «BKZ-420». During the research of physical and chemical processes, aside from the mathematical models, 2D and 3D models were examined as well. Along with this, considering kinetics of chemical reactions of Navier-Stokes three-dimensional equations, thermal and aerodynamic characteristics of flows were defined within the burner, the exit, along the longitudinal cuts, which in the combustion chamber take place in the basics of turbulence equations and diphasе of environment. Methods of decreasing the levels of environment contamination and maintaining them in the normal condition are being considered. Obtained results of experimental research were compared to the results of the main experiment, taken from TES center.

**Key words:** coal, burning, heat of combustion, energy, physical and chemical processes, power equipment, dust burner, combustion chamber.

Данная работа посвящена изучению физико-химических процессов при сжигании твердого топлива в виде пыли в камере сгорания промышленных котлов БКЗ-420. При исследовании физико-химических процессов, помимо математических моделей, рассматривались 2D и 3D модели. Также численным экспериментом были определены тепловые и аэродинамические характеристики потоков в области горелки, выхода и вдоль продольных сечений в камере горения, с помощью трёхмерных уравнений Навье-Стокса и кинетики химических реакций. Рассмотрены методы понижения уровня загрязнённости окружающей среды и поддержания её в нормальном состоянии. Полученные результаты экспериментального расчёта были сравнены с результатами основного эксперимента, взятых с ТЭС.

**Ключевые слова:** уголь, горение, теплота горения, энергетика, физико-химические процессы, энергетическое оборудование, пылеугольная горелка, топочная камера.

**БКЗ-420  
ҚАЗАНДЫҒЫНЫҢ  
ЖАНУ  
КАМЕРАСЫНДАҒЫ  
ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ  
ПРОЦЕСТЕРДІ  
МАТЕМАТИКАЛЫҚ  
МОДЕЛЬДЕУ**

**Кіріспе**

Бүгінгі таңда қоршаған ортаға залалын көп тигізетін энергетикалық кешенде жануға байланысты маңызды зерттеулер жүргізу қажет. Соған сәйкес төменгі сұрыпты қатты отындарды жағу процесін жақсарту үшін жаңа технологиялық процестерді жетілдіру керек. Мұндай шаралар қоршаған ортаға шығатын зиянды қалдықтың төмендеуін және ЖЭС орталықтарының негізгі көрсеткіштерін көтеруін қамтамасыз етеді.

Осылайша, тозаңды отынды жағатын құрылғылардың технологиясын зерттеу және әртүрлі отындарды жағу процесін тиімді ұйымдастыру әдісін қолдану қазіргі таңдағы Қазақстан Республикасының энергетикалық кешендерінің өте маңызды мәселесі болып табылады. Шаңкөмірдің жануын жетілдіру және отынның балама түрлерін қолдану – жану қазандықтарындағы пайдаланылған газдардың зиянды бөлшектерін шығару бойынша қатаң экологиялық талаптарды орындау болып табылады [1]. Сонымен, қазіргі кезеңде зиянды шаң газ шығаруларын қалыптастырудың негізгі процестерін сипаттайтын технология ойлап табу және есептеу жүргізу өте маңызды.

Қатты отындардың жануының физика-химиялық процестерінің сипатын зерттеу үшін біз, жанудың сандық модельдеуін (*Computational Combustion*) – есептеу гидродинамикасының (*Computational Fluid Dynamics, CFD*) өте күрделі ғылыми бағыты ретінде сандық есептеулер жүргіземіз [2]. Таңдап алынған БКЗ-420 жану қазандығында өтетін жылдамдық, температура, басқада негізгі компоненттердің концентрациясының қазандық бойымен таралуын FLOREAN көмегімен сандық есептеу арқылы алынған сандық мәліметтер базасын PARAVIEW көмегімен диаграммалық тұрғыдан зерттейміз. Алынған жаңа нәтижелерге сүйене отырып, осы күндері әлемдік деңгейге айналған энергетика кешеніндегі күрделі мәселелердің оңтайлы жолдарын табуға ықпал жасаймыз.

Жану құбылыстарын математикалық жолмен сипаттау – Навье-Стокс теңдеулерінің негізінде құрылады және Лагранж, Лаплас, масса-жылу алмасу, турбуленттік теңдеулермен сипат-

талады. Аталған теңдеулерді шекаралық шарттарға сүйене отырып есептеудің шешілуін жеңілдеті аламыз. Бірақ, бұл теңдеулерді аналитикалық жолмен шешу мүмкін емес, әрі біз көздеген мақсатымызға жете алмаймыз. Бұл теңдеулерді шешудегі мақсат пен мәселелер, ол экономикалық және экологиялық тиімділіктер негізіндегі қажеттіліктен туындайды. Ал бізге халықаралық стандартты CFD кодтарды қолдану арқылы жоғары деңгейдегі дәлдігі жоғары нәтижелерге қол жеткізуге мүмкіндік береді [3]. Мәселен, жылу электр станциясының қазандығынан атмосфераға шығатын  $CO$  және  $CO_2$ ,  $NO_x$  типтегі зиянды газдардың шығу мөлшерін есептеуге мүмкіндік береді.

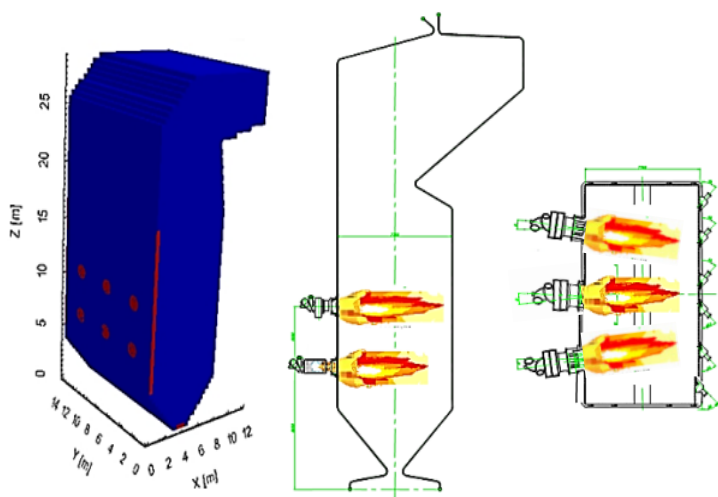
### Теориялық есептеулер

Бұл жұмыс тозаңды отынды яғни көмірді Алматы ЖЭС-2 БКЗ-420 қазандығының жану камераларында жану процесі барысында болатын физика-химиялық процестерді зерттеп, оларды математикалық модельдеуге арналған. Алматы ЖЭС-2 БКЗ-420 қазандығының – бу шығару қуаты 420 т/сағ-на тең, пештің беткі жағында үш-үштен екі деңгей бар, алты құйынды шаңкөмірлі жандырғыштармен жабдықталған. Қазандықта құрамында 40% күл, ылғалдылығы

25%, ұшып кететін газдары 24% және ең жоғарғы жану жылуы 16 750 кДж/кг болатын төменгі сортты, жоғарғы қалдықты Екібастұз көмірі жанды. Отын қалдығының мөлшері  $R_{90}=15\%$  тең болды. Алдында аталып өтілген екі деңгейден тұратын жандырғыштардың әр деңгейіндегі шеткі жандырғыштары ортадағы жандырғышқа 8 градус бұрышпен қарап тұр. Әр жандырғыш сағатына 12 тонна Екібастұз көмірін жаға алады. Жандырғыштардың орналасуы 1-ші суретте көрсетілген

Осылайша, БКЗ-420-140 қазандығының жану камерасындағы күлділігі жоғары Екібастұз көмірінің тәжірибелік жануының жану процесі мен техника-экономикалық көрсеткіштерге теріс әсері ПК-39 қазандығымен салыстырғанда төменірек, ал БКЗ-160 қазандығымен салыстырғанда жоғарырақ болды. Икемделуі мен үнемділігі бойынша бұл қазандық тікелей үрлемелі және балғалы диірмендері бар қазандықтар ішіндегі ең жақсысы болып табылады.

Қазіргі уақытқа дейін жылулық сәуле тасымалдау мен турбуленттік жану, турбуленттік ағыстарды есептеуге арналған әртүрлі математикалық модельдер жасалынып шығарылған. Тіпті, көрсетілген математикалық модельдері жүзеге асырылған, өте қуатты есептегіш программалық кешендер ойлап табылған [4].



1-сурет – БКЗ-420 жану қазандығының сұлбасы

Есептеулерді параллельдеу мүмкіндігі және жоғарғы өнімді есептеуіш жүйелердің дамуы үлкен мөлшерлі сеткаларда детальдік есептеулерді тиімді өндіруге мүмкіндік береді.

Физика-химиялық процестер болған жағдайда жылу-масса тасымалын модельдеу үшін масса, аумақ, импульс, энергияның фундаментальді сақталу заңдары қолданылады. Өйткені, физика-

химиялық айналулар болған жағдайында жылу-масса алмасу турбулентті қозғалыстар мен химиялық процестердің әрекеттесуін білдіреді, онда біз қоспаның әсерлесетін компоненттерінің сақталу заңын, турбуленттікті, ортаның көп фазалығын, қыздырылған орта мен химиялық реакцияның сәулелену нәтижесінде жылу бөлгіштігін ескеруіміз қажет.

Жоғарғы температуралық ортада техникалық ағындарда физика-химиялық үдеріс болған жағдайда әрдайым турбуленттік болып табылады. Турбуленттік режим сұйықтықтың барлық қабаттарының үздіксіз араласуымен сипатталады. Турбуленттік – сұйықтықтың қасиеті емес, ол сұйық ағысының қасиеті. Турбуленттік ағыстың негізгі сипаттамалары сұйықтың молекулалық қасиеттерімен анықталмайды және пульсация-хаосты өзгерулерді сынады. Жану-камерасында шаңкөмір алаудың екіфазалы ортасы болады. Біз қатты шаңкөмірдің қатысуына түзетулер енгізілген тұтас орта үшін теңдеулерді қолданамыз. Мұндай орта шартты түрде, жану камерасында болатын техникалық ағыстарда екінші фазаның әсері, қатты фазаның аэродинамикалық ағысқа әсер ете алатын шаңкөмір алауы-екі фазалы газдисперсиялық орта деп саналады. Әр түрлі координаттар жүйесінің ішінен декарттық координаттар жүйесін аламыз, өйткені, цилиндрлік және сфералық координат жүйелерінде көрсетуге болатын айқын бейнеленген обылыстары жоқ, оңайырағы жану қазандығының турбуленттік ағымының есептеуіне қойылған мақсаттарды декарттық координаттар жүйесінде шешу. Қисық сызықты торды қолдану тасымалдау теңдеулеріндегі қосымша мүшелердің және адекватты тордың генерациялау қажеттілігіне әкеледі [6].

### Эксперимент нәтижелері

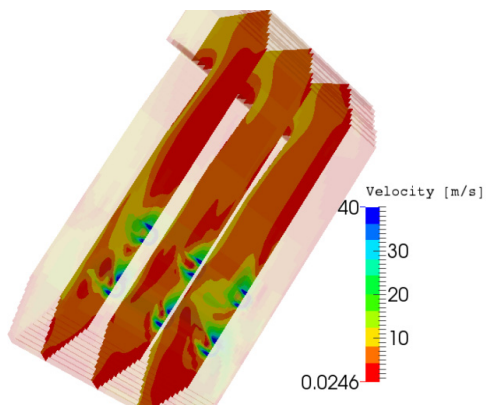
Зерттеу объектісі ретінде 420 т/сағ бу өндіру қуатына ие Алматы ЖЭС-2 БКЗ-420 қазандығының жану камерасы таңдап алынды. Бұл тәжірибеде БКЗ-420-140-7С жану қазандығының көмір шаңының жануының қарапайым нұсқада жұмыс істеуі қарастырылды. Жылдамдық құраушыларының камера бойымен таралуының 2Д графиктері алынды. 1-суретте көрсетілгендей БКЗ-420 жану қазандығының 6 оттығы бар болып, олар екі деңгейде орналасқан. Жоғарғы деңгей Z өсі бойында 10,75м де 3 оттық орналасқан, ал төменгі деңгей Z өсі бойында 6,85м де 3 оттық орналасқан, әрдеңгейдегі екі

шеткі екі оттық ортадағы оттыққа 8 градус бурыш жасай орналасқан. БКЗ-420-140-7 қазандығы бұдың жоғары параметрлі жылутурбиналары арқылы жылу электр орталықтарында қыздырылған бу өндіру үшін Екібастұз көмірін жағу нәтижесінде жұмыс атқаруға бағытталған [7].

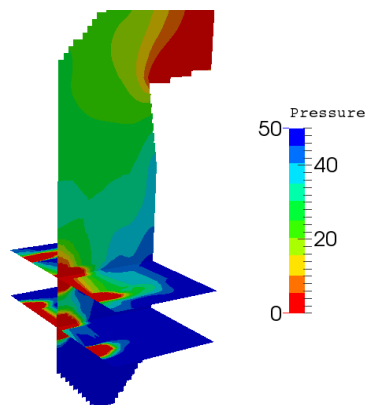
Қазандық негізінен вертикальді су құбырлы бар бір барабанды, табиғи циркуляциялы, бір корпусты және жоғары бу параметрлеріне негізделген. Сонымен қатар қазандық жоғары тығыздықты газды күйінде П – типті жабық түрде жасакталып бірқалыпты тарту қуатына ие. Жану камерасында қатты түрдегі қалдықты жою қарастырылған. Әрі қалдықты үздіксіз шекті тасымалдаушы мен үгіткіштердің көмегімен жою автоматтандырылған. Сондай-ақ жану камерасы – призмалы, ашық типті, құбырларының осьтері бойынша өлшемдері 14,46×12,052×29,102 (м<sup>3</sup>) тең. Жану камерасы тұтастай дәнекерленген жоғарғы тығыздықтағы газды буландыратын құбырлы қабырғаларымен жабдықталғын.

Қазандық бойымен бөлшек ағын жылдамдық таралуы Y өсі бойынша оттықтар Y<sub>1</sub>=2.85 m, Y<sub>2</sub>=7.2 m, Y<sub>3</sub>=11.69 m кесіндісінде бейнеленген (2-суретте). Жылдамдықтың ең жоғарғы мәні 40 м/с болып, ол жандырғы кірсінде болады. Екі деңгейлі жандырғылардың жоғарғы бөлігіндегі жылдамдық төменгі бөліктегі жылдамдыққа қарағанда жоғары болатындығын аңғаруға болады.

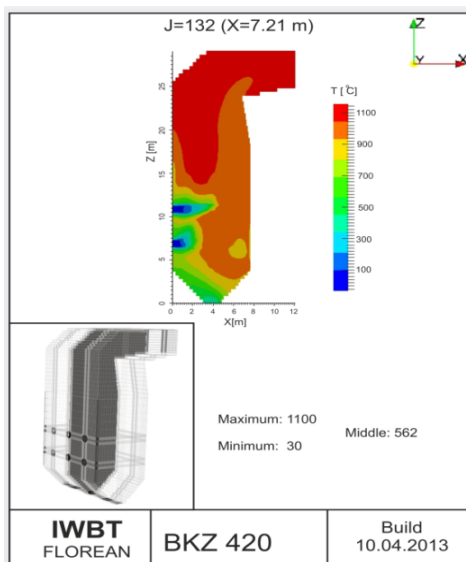
Бұл суреттен көріп отрғанымыздай жалпы жылдамдық модулінің қазандықтың ішкі кеңістігі бойынша БКЗ-420 жану қазандығының тік бойлық қимасы бойынша Y1=2.85 m, Y2=7.2 m, Y3=11.69 m кесінділерінде таралуының жалпы сипаты келтірілген. 2-ші суреттен көріп отырғанымыздай жылдамдықтың максимум мәндері қазандықтың шеткі жанарғылар аймағында байқалады. Максимум жылдамдық 40 м/с, бұл өз кезегінде екінші деңгейлі (h=10.78 m) жанарғылар тұсына сәйкес келеді. Ал қазандықтың шығысында жылдамдықтың мәні айтарлықтай төмендейтіндігін аңғаруға болады, шамамен 8 м/с. Толық жылдамдық векторы барлық жылдамдықты құраушыларының квадраттарының қосындысының түбірінен табылады ( $\vec{V} = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$ ) және суреттерде олар түрлі түстермен кескінделген бағытаушы сызықтармен белгіленген, ал олар бойынша мәндердің түстік шкаласы арқылы әрқайсысының нақты сандық шамасын көруге болады.



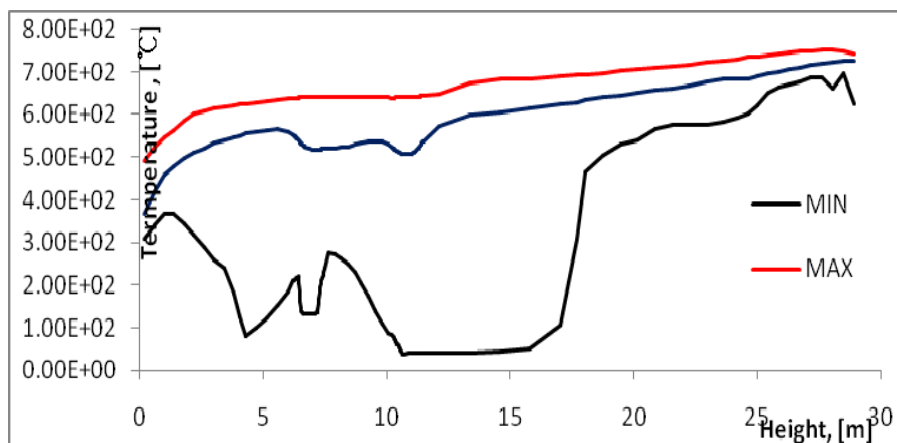
2-сурет – БКЗ-420 жану қазандығының  $Y_1=2.85$  m,  $Y_2=7.2$  m,  $Y_3=11.69$  m кесіндісіндегі жылдамдық таралуы



3-сурет – Қысымның қазандықтың ортаңғы жанарғылар тұсы бойынша бойлық және жанарғылар бойынша көлденең 2 қимасы.



4-сурет – Температураның қазандықтың бойлығы бойынша ортаңғы бөлігінің тік қимасы



5-сурет – Қазандықтың биіктігі бойынша температураның таралу графигі

3-суреттен көріп отырғанымыздай қысымның таралуының максимум мәндері қазандықтың төменгі бөліктерінде, ал керісінше минимум мәндері жанарғылардың тұсына сәйкес келеді. Бұған басты себеп, бұл маңайда жылдамдық мәнінің жоғары болуы. Оған алдыңғы қимадан көз жеткізуге болады. Ал қысым жылдамдыққа кері пропорционал.

4 қимадан байқап отырғандай жанарғылардың тұсында температура өте төмен (4-сурет). Ал температураның мәні қазандық шығысында болып ол 745 °С болады. Төменгі температура жандырғылардың кірісінде болып ең төменгі мәні 133 °С болады.  $Y_1=2.85$  m,  $Y_3=11.69$  m кесіндісіндегі жылудың таралуы  $Y_2=7.2$  m кесіндісіндегі жылудан жоғары екенін аңғарамыз. Бұл маңайда отынымыз қанша майда болса да, жылдамдықтың жоға-

ры болуы салдарынан, жанып үлгермейді. Осыған орай температураның мәні отынның толықтай жанып болып, жылу көп бөлген аймағында (қазандықтың жоғарғы бөлігінде) максимум мәнге ие. Нақтылай өтетін болсақ, температураның максимум мәні – 1100 °С, орташа мәні – 562 °С, минимум мәні – 30 °С.

5-суретте алдыңғы қималарды нақтылай түсетін температураның таралуын сипаттайтын ортақ көрініс көрсетілген.

### Қорытынды

Алынған нәтижелер негізінде энергетика кешенінде туындап отырған мәселелерді (экологияға мейілінше аз зардап тигізу, жаңа типтегі қазандықтар жасау, энергияны тиімді пайдалану, т.б.) шешу мүмкіндіктері кеңейеді.

### Әдебиеттер

- 1 Askarova A.S., Messerle V.E., Ustimenko A.B. et al. Numerical simulation of the coal combustion process initiated by a plasma source // Thermophysics and Aeromechanics. – 2014. – Vol. 21. – Issue 6. – P. 747-754.
- 2 Messerle V.E., Ustimenko A.B. et al. Pulverized coal torch combustion in a furnace with plasma-coal system // Thermophysics and Aeromechanics. – 2010. – Vol. 17. – Issue 6. – P. 435-444.
- 3 Karpenko E.I., Lavrishcheva Y.I., Messerle V.E. et al. Plasma-supported coal combustion in boiler furnace // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2007. – Vol. 35. Issue 6. – P. 1607-1616.
- 4 Karpenko E.I., Messerle V.E., Ustimenko A.B. et al. Plasma enhancement of combustion of solid fuels // High energy chemistry. – 2006. – Vol. 40. – Issue. – P. 111-118.
- 5 Leithner R. Numerical Simulation. Computational Fluid Dynamics CFD: Course of Lecture. – Braunschweig, 2006. – 52 p.
- 6 Müller H. Numerische simulation von Feuerungen. CFD–Vorlesung, TU. – Braunschweig: IWBТ, 1997. – 8-12 s
- 7 Askarova A.S., Bolegenov, S.A. Maximov V.Yu. et al. Computational method for investigation of solid fuel combustion in combustion chambers of a heat power plant // High Temperature. – 2015. – Vol. 53. – Issue 5. – P. 751-757.

### References

- 1 A.S. Askarova, V.E. Messerle, A.B. Ustimenko et al. Thermophysics and Aeromechanics, 6, 747-754, (2014).
- 2 V.E. Messerle, A.B. Ustimenko et al., Thermophysics and Aeromechanics, 6, 435-444 (2010).
- 3 E.I. Karpenko, Y.I. Lavrishcheva, V.E. Messerle, et al., IEEE Transactions on Plasma Science, 6, 1607-1616, (2007).
- 4 E.I. Karpenko, V.E. Messerle, A.B. Ustimenko et al., High energy chemistry, 2, 111-118, (2006).
- 5 R. Leithner, Numerical Simulation. Computational Fluid Dynamics CFD: Course of Lecture. Braunschweig, 2006. – 52 p.
- 6 H. Müller, Numerische simulation von Feuerungen. CFD – Vorlesung, TU. Braunschweig: IWBТ, 1997. 8–12 (in Ger.)
- 7 A.S. Askarova, S.A. Bolegenov, V.Yu. Maximov et al., High Temperature, 5, 751-757 (2015).