

Бекетаева М., Бостандықов Б., Қазбек Н., Әділбек Ж.

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті

ТҮРЛІ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ ШЕКАРАЛЫҚ ШАРТТА ЖАНУ ПРОЦЕСТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа: Шахтинск ЖЭО-ның БҚЗ-75 қазандығының жану камерасында КР-200 маркалы қарағандылық көмірді жағу кезінде туындайтын жылумассатасымалдану процестерін реалды жану процестеріне тән оптималды жағдайларын таңдау бойынша сандық зерттеу жүргізілді. Ол үшін реалды технологиялық процесті сипаттайтын физикалық, математикалық және химиялық моделдері құрылды. Жану камерасының қабырғаларындағы температураның жану процестерінің сипаттамаларына әсерін зерттеу бойынша есептеу тәжірибелерін жүргізу, сандық есептеу нәтижелерін салыстыру және ҚР-ң ЖЭО-да отандық төменгі сұрыпты көмірді жағу бойынша әрі қарай сандық есептеулер жүргізу үшін температураның тиімді шекаралық шарты анықталды.

Кілт сөздер: жану, концентрация, көмір, моделдеу, таралу өрістері

Кіріспе

Жылу электр станциялары қоршаған ортаға зиянды әсерін тигізетін ошақтардың негізгілерінің бірі болып табылады. ҚР-да қызмет ететін энергоблоктардың жартысына жуығы 40 жылдан аса эксплуатациялануда, сондықтан да олар оптимизациялану мен модернизациялануды қажет етеді [1]. Жылуфизика мен жылуэнергетиканың заманауи даму сатысының өзекті мәселесі ретінде қатты отынның жану процесін оптимизациялау және қоршаған ортаны қорғауда және энергетикалық құрылғылардың эффективтілігінің жоғары деңгейін қамтамасыз етуде «таза» технологияларды жобалау мен қолданудың қажеттілігін атап өтуге болады. Бұл өз кезегінде қазандықтардың жану камераларында орын алатын қатты отынның жану процестеріне қатысты сұрақтарды тереңдете оқуды және ЖЭС-да болып өтетін технологиялық процестерді физикалық, ғылыми-қолданбалы, технологиялық және инженерлі-жобалық зерттеулер арқылы қатты отынның жануын оптимизациялау мәселелерін жете талдауды талап етеді [2].

Қазіргі таңда компьютерлік технологиялардың және сандық моделдеу әдістерінің қарыштап дамуы сандық эксперимент нәтижелерінің жоғарғы дәлдігі мен олардың натурал эксперимент нәтижелерімен сәйкестігін қамтамасыз етеді. Сандық технологияларды қолдану (CFD) натуралды эксперименттерді жүргізбей-ақ, реалды энергетикалық объектілерде болатын жылуфизикалық және гидроаэродинамикалық процестердің параметрлері мен режимдерін айқындауға бағытталған сандық тәжірибелерді өткізуде бастапқы даярлықты жасауда және кейінгі зерттеулер жүргізу кезінде пайдаланыла алатын мәліметтерді алуға мүмкіндік жасайды [3-5].

Әдістері

Компьютерлік технологиялардың үздіксіз және тұрақты дамуы инженерлік жобалау тәсілдерін өзгертті. Сандық үлгілеу қуатты есептеу компьютерлерін пайдалана отырып жылумассатасымалдау процестерінің фундаментальды теңдеулерін шешудің сандық әдістерін қолданады [6-7]. Сандық үлгілеудің фундаментальды негіздері – бұл физикалық жүйені математикалық сипаттауды дамыту. Сандық үлгінің сипаттамасы массаны, импульсты, энергияны сақтаудың бірқатар физикалық заңдарына негізделеді. Сонымен қатар, таңдалған теңдеулер жүйесін тұйықтау үшін фундаментальды арақатыстар қолданылады. Демек, математикалық үлгі дифференциалды теңдеулердің, алгебралық тұйықтаушы қатынастардың және жиектік (бастапқы және шекаралық) шарттардың жүйелерінен тұрады.

Массаның сақталу теңдеуін келесі түрде жазуға болады:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_i. \quad (1)$$

Импульстың сақталуы келесі түрдегі Навье-Стокс теңдеуімен жазылуы мүмкін:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i. \quad (2)$$

Энергияны сақталу теңдеуі өткізгіштік, диффузия, сондай-ақ тұтқыр диссипация есебінен энергияның таралуын есепке алады:

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho h u_i) = \frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} (k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i}) - \frac{\partial}{\partial x_{ij'}} h_{j'} J_{j'} + (\tau_{ij'})_{eff} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + S_h. \quad (3)$$

Тасымалдау теңдеуі ағынның жиынтық айнымалы ϕ үшін компоненттердің массасын немесе түрлерін, импульсты немесе энергияны білдіретін турбулентті ағындарда жиынтықталған тасымалдау теңдеулері түрінде жазуға болады:

$$\frac{\partial (\rho \phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \phi u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} (\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i}) + S_\phi. \quad (4)$$

Тасымалау теңдеуінің турбулентті энергиясын келесі түрде жазуға болады:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i (\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i} (k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j (\tau_{ij})_{eff}) + S_h. \quad (5)$$

Жұмыста сандық есептеулер FLOREAN бағдарламасы (FLOWREAction – ағындардың әрекеті) арқылы орындалды. Онда газды-отынды қоспа үшін бақылау көлемі әдісімен жылу масса тасымалдау теңдеулерін шешуге негізделеді, ал турбуленттілік үлгісі үшін кеңінен танымал стандартты k-ε үлгісі таңдалған. Бағдарлама импульс, энергия, заттардың компоненттерінің үлгілерінен, SIMPLE қысымды түзету әдісінен, жылулық сәулеленудің алты ағынды үлгісінен тұрады. Тасымалдаудың дифференциалды теңдеулерін сандық шешу үшін 2-ші ретті жеке туындылы сызықтық емес дифференциалды теңдеулердің тұйық жүйе үшін бақылау көлем әдісі пайдаланылады.

БКЗ-75 қазандығы тік-су құбырлы конструкциялы, жұмыс ортасының П-тәріздес қозғалыс сұлбасына ие, ол барабан арқылы табиғи циркуляцияға негізделген. Есептеу эксперименттерін жүргізу үшін зерттелетін объектінің геометриясы нақты сұлбасына сәйкес құрылған, айырмалық тор осьтері бойынша келесідей қадамдарға ие X, Y, Z: 59×32×67, бұл 126 496 бақылау көлемдерін құрайды.

Берілген температура кезінде қабырға мен ыстық отын-ауа ағымының арасындағы конвективтік жылу алмасу қабырға маңылық аумақтағы ағынмен анықталады. Адиабаттық қабырғалар үшін (от жағу камерасының қабырғаларының температурасы тұрақты) жылу ағыны Q_w нөлге тең ($Q_w=0$) және бұл жағдайда симметрия жазықтығындағыдай жиектік шарттар пайдаланылады. Қабырға мен реттеуші ағын

арасында жылу алмасу жағдайында қабырға немесе жылу ағыны температурасын қоюға болады (жану камерасының қабырғасының температурасы айнымалы). Жылу берілудің конвективтік коэффициенті α белгілі болса, жылу ағынын келесі жолмен алуға болады:

$$q_w = \alpha(T_{wp} - T_w).$$

Қабырға температурасы айнымалы болған кезде $\dot{q}$ жылу ағыны келесідей есептелінеді:

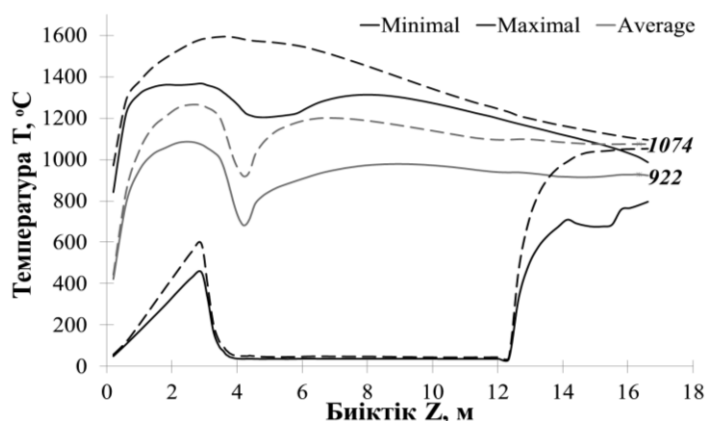
$$\dot{q} = \underbrace{\alpha(T_{FG} - T_{Surf})}_{\text{конвекция}} + \underbrace{C_{12}(T_{FG}^4 - T_{Surf}^4)}_{\text{радиация}}, \quad (6)$$

мұнда $C_{12} = \varepsilon_{12}\sigma$, T_{FG} – шығыс газдардың температурасы, T_{Surf} – камераның бет температурасы, α – конвекция арқылы жылудың берілу коэффициенті, Вт/м²·К, ε_{12} – қабырғаның сәулелену қабілеті, σ – Больцман тұрақтысы, Вт/м²·К⁴.

Зерттеу нәтижелері

Камераның қабырғаларындағы температура үшін шектік шарттарды өзгертудің жылу масса тасымалдау процестеріне әсерін зерттеу нәтижелері қорытындыланған. Есептеу эксперименті кезінде Шахтинск ЖЭО БКЗ-75 қазандығының от жағу камерасында КР-200 маркалы көмірін жағудың адекватты үлгісін таңдауда қабырғалардың температуралары үшін оңтайлы шектік шарттарын анықтау үшін жану процесінің температуралық таралымдары (Т) зерттелді.

1-суретте оттықтың қабырғаларының температуралары үшін шектік шартты өзгертудің екі жағдайлары үшін оттықтың көлемінің биіктігі бойынша температураның ең жоғарғы, ең төменгі және орташа мәндерін бөлу графиктері берілген. Шектік шарттардың екі жағдайлары үшін жанарғы аумағындағы температуралардың ең төменгі мәндері үрленетін аэрокоспаның төмен температурасымен негізделген. Графиктерден көрініп тұрғандай, қабырғалардың температуралары үшін шектік шарттарды өзгерту от жағу камерасындағы температураны бөлу сипатына елеулі әсер етеді.



--- тұрақты температурада, — айнымалы температурада

1-сурет. Қабырғаның екі түрлі температуралық шекаралық шарты үшін жану камерасының биіктігі бойындағы температуралық өріс өзгерісі

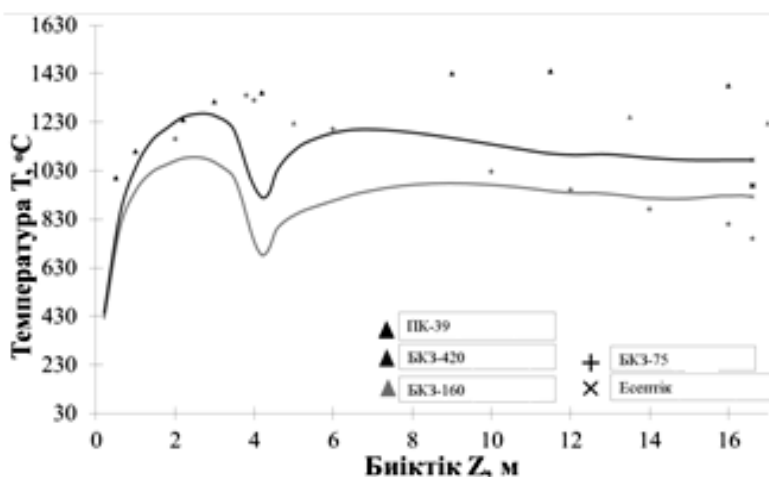
Екі шектік шарттары үшін температураны бөлу қисығын талдай отырып (1-сурет) оттықтың биіктігі бойынша бастапқы учаскелерде (~1 м дейін) айырмашылықтардың

елеусіз екендігін байқауға болады, себебі онда от жағу камерасының төменгі жағында суық шұңқырдың болуы салдарынан температуралық мәндер біркелкі бөлінеді. Бөлінген температураларда елеулі айырмашылықтар жанарғы құрылғыларының орналасу аумақтарында және ары қарай оттық кеңістігінен шығу бағытында алаудың ұзындығы бойынша туындайды. Бұл жанарғылардан аэроқоспаны үрлеу кезінде, отынды тұтату, оның жануы кезінде туындайтын жылудың бір бөлігі от жағу камерасының қабырғаларына берілетіндігімен түсіндіріледі, оның температурасы барлық уақытта өзгеріп тұрады.

Оттық кеңістігінің шығысына жылжу шамасына қарай, жану өнімдерінің жанғыш газдары мен тотықтырғыштың арасындағы химиялық түрленулермен физикалық процестер әлсірейді, бұл оттықтың шығысында температураның төмендеуіне әкеледі. Осылайша оттық кеңістігінен температура, камераның қабырғаларының айнымалы температурасы жағдайында 922°C тең орташа мәнге ие болады, ал қабырғалардың тұрақты температурасы жағдайында, температураның орташа мәні 1074°C тең.

ЖЭО жақындастырылған шарттарда нақты технологиялық процесті неғұрлым жақсы сипаттайтын от жағу камерасының қабырғаларының температурасы үшін шектік шартты таңдауда 2-суреттегі қисықтарды талдау температуралық қисықтар мен өлшенген температура мәндері сапалық тұрғыдан сәйкес келетіндігін көрсетеді. Эксперименттік мәліметтер алау аумағында, сондай-ақ от жағу кеңістігінің шығысында неғұрлым жоғары мәндерге ие. Бұл эксперименттердің өзіндік ерекшеліктеріне (от жағу камерасының мөлшері, жанарғы құрылғыларының түрі және орналасуы, отынды және тотықтырғышты беру тәсілі және т.б. (ПК-39, БКЗ-420 және БКЗ-160 [8-10])) байланысты түсіндіріледі.

Оттықтың шығысындағы теориялық есептелген мәндердің есептеу экспериментінің нәтижесімен айырмашылығы шектік шарт үшін барлығы 45°C құрайды, ал камера қабырғаларының температурасы айнымалы болады (бұл $\sim 4,6\%$ құрайды) және камераның қабырғаларының 106°C тұрақты температурасында ($\sim 10,9\%$).



Сызыктар – сандық тәжірибелер;
 --- тұрақты температурада, ——— айнымалы температурада;

2-сурет. Жану камерасындағы сандық тәжірибе нәтижелерін верификациялау

Қорытынды

Пайдаланылатын айнымалы температурамен қазандықтың камерасының қабырғалары үшін шектік шарттарымен математикалық, физикалық және сандық үлгілердің есептеулері үшін адекватты болып табылатындығы туралы тұжырым жасауға

болады және ары қарай қолданыстағы қазандық агрегаттарының оттықтарындағы жылу масса тасымалдау процестерін зерттеу кезінде пайдалануға ұсынылады.

Пайдаланылған әдебиеттер тізімі

- 1 Алияров Б.К. Казахстан: Энергетическая безопасность, энергетическая независимость и устойчивость развития энергетики. Состояние и перспективы // www.clrma-teaction.kz.
- 2 Askarova A., Bolegenova S., Safarik P., Maximov V., Beketayeva M. Numerical Modeling of Pulverized Coal Combustion at Thermal Power Plant Boilers 3D // Journal of Thermal Science. ISSN: 1003-2169, ISSN:1003-2169. – 2015. – Vol. 24, №3. – P. 275-282.
- 3 Heierle E.I., Beketayeva M.T., Yergaliyeva A. B. CFD study of harmful substances production in coal-fired power plant of Kazakhstan // Bulgarian Chemical Communications. – 2016. – Vol. 48. – Special Issue E. – pp. 260-265.
- 4 Askarova A.S., Bolegenova S.A., Beketayeva M.T. etc. Computational Method for Investigation of Solid Fuel Combustion in Combustion Chambers of a Heat Power Plant // High Temperature. – 2015. – Vol. 53, №5. – P. 752–758.
- 5 Leithner R., Askarova A., Beketayeva M., etc. Computational modeling of heat and mass transfer processes in combustion chamber at power plant of Kazakhstan //MATEC Web of Conferences 76, 06001 (2016). CSCC 2016. P. 5.
- 6 Leithner R. Numerical Simulation. Computational Fluid Dynamics CFD: Course of Lecture. – Braunschweig, 2006. – 52 p.
- 7 Leithner R., Müller H., Heitmüller R. Dreidimensionale Simulation von Dampferzeuger-Brennkammern einschließlich der NO_x-Schadstoffkinetik // VGB-Fachtagung: Dampfkessel und Dampfkesselbetrieb. – Essen, 1993. – 152 p.
- 8 Алияров Б.К., Алиярова М.Б. Сжигание казахстанских углей на ТЭС и на крупных котельных: опыт и перспективы. – Алматы, 2011. – 306 с.
- 9 Устименко Б.П., Алияров Б.К., Абубакиров Е.К. Огневое моделирование пылеугольных топок. – Алматы: Наука, 1982. – 212 с.
- 10 Тепловой расчет котлов: Нормативный метод. – СПб.: Изд. АООТ НПО ЦКТИ, 1998. – 270 с.

Бекетаева М., Бостандыков Б., Казбек Н., Адилбек Ж.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Аннотация: Проведен вычислительный эксперимент по выбору оптимальных граничных условий при горении низкосортного карагандинского угля марки КР-200 в камере сгорания БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ. Определено условие непостоянства температуры как наиболее адекватное и применимое для численных исследований процессов сжигания органического топлива в реальных камерах сгорания ТЭЦ РК.

Beketayeva M., Bostandykov B., Kazbek N., Adilbek Zh.

INVESTIGATION OF COMBUSTION PROCESSES AT VARIOUS TEMPERATURE BOUNDARY CONDITIONS

Annotation: A computational experiment was performed to select the optimal boundary conditions for burning low-grade Karaganda coal of KR-200 grade in the combustion chamber of BKZ-75 of Shakhtinsk TPS. The condition of temperature variability is defined as the most adequate and applicable for the numerical studies of burning of organic fuel in real combustion chambers of the thermal power station of the Republic of Kazakhstan.