

УДК 621.1

## АЗОТ ТОТЫҒЫН ТӨМЕНДЕТУ МАҚСАТЫНДА ҮШ САТЫЛЫ ЖАҒУ ТЕХНОЛОГИЯСЫНЫҢ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ ПРОЦЕССТЕРІ

Қалиқан Айнұр Жайыққызы, Тойымбеков Руслан Әнуарбекұлы,  
Балғабаева Динара Тлеужанқызы  
kalikan.ainur@mail.ru

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университетінің жылуэнергетика кафедрасының  
магистранттары, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

**Түйінді сөздер:** отын, отын жану, көмір, үш сатылы жану, физика–химиялық процесстер

Қатты отынды үш сатылы жағу технологиясы өнеркәсіптік энергетикалық оттықтардың техникалы-экономикалық көрсеткіштерін және оттық процесінің экологиялық тазалығын көтеру мақсатында қолданылады. Қарастырып отырған технологияда қазандықтың негізгі оттықтарына 80-90% отын қалыпты артық ауа мөлшерімен жіберіледі. Бұл орнықты тұтану мен тиімді жануды қамтамасыз етеді. Отынның қалған бөлігі (табиғи газ немесе басқа отын түрлері) қосымша оттықтарға беріледі. Осы аралықта артық ауа мөлшерінің жетіспеушілігінен жану өнімдерінің коэффициенттері 0,9-0,95% төмендейді.

Қатты отынды жағу процесі ауадағы оттегі бар жанғыш заттың (көмірдің) тез және толық тотығу процесі, жоғары температура кезінде жүретін және үлкен жылуды босататын күрделі физика-химиялық құбылыс болып табылады. Ауа тотықтырғышы әсерінен көмірдің жану процесінің химиялық моделін құрайтын теңдеулермен сипатталып және математикалық модельде ескеретін бірнеше этаптан өтеді.

Отын ретінде шаң тәріздес көмір пайдаланылады, ал тотықтырғыш ретінде ауа қолданылады, сол ауаның жалпы массасының 23,2% оттегі құрайды. Отынды жағу кезінде қоршаған ортаға зиянды заттар шығарылады. Оның қатарында қауіпті газдар шығарындыларына  $NO_x$ ,  $CO$  және  $SO_x$  кіреді. Олардың ең қауіптісі -  $NO_x$ .  $NO_2$  мөлшерін есептеу барысында екі атомды азоттың пайыздық мөлшерін  $NO_x$  (10%) жалпы санынан қолдануға болмайды, себебі бұл есептеулерде өте маңызды қателерге әкеледі.

$NO_x$ -ты төмендетуге арналған негізгі әдістер: сатылы жағу, каталитикалық түрлендіргіштер, түтін газын рециркуляциялау, төмен эмиссиялық оттықтар, азот мөлшері төмен болатын мазутты қолдану, селективті каталитикалық төмендету (СКК) және селективті емес каталитикалық төмендету (СНКК).  $NO_x$  және  $CO$  деңгейін төмендетудің бірнеше жолы бар, соның ішінде ең тиімдісі отынды жағу кезінде технологиялық тұрғыдан анықталады. Бұл әдіс күрделі шығындардың өсуін талап етпейді, сондай-ақ технологияны қарапайым түрде жүзеге асыруға болады. Олардың ішіндегі ең тиімдісі сатылы жағу болып табылады. Оның мәні отын мен ауаны қазандыққа (горелка деңгейлері бойынша) беруге байланысты. Бұл әдіс жану камерасын үш зонаға бөледі. Бірінші зонасы - артық ауа коэффициенті  $\alpha_1 = 1$  тең болатын негізгі жану зонасы, екінші қалпына келу зонасы, стехиометриялық қатынасы  $\alpha_2 = 1$ . Үшінші зонада  $\alpha_3 = 1,2$  ұстап тұратын ауаның енгізілуі есебінен толық жандыру жүретін аймақ. Оттықта азот тотығы мөлшерін төмендету артық ауа мөлшері  $\alpha = 1,1 \div 1,3$  диапазонында отынның толық жағуымен бірге жүреді. Бұл аралық

қажетті мөлшердегі оттегінің және температура деңгейінің жоғары болуын қамтамасыз етеді.

### Үш сатылы жағу процесінің физика-химиялық моделі

Отынды жағу технологиясының физика-химиялық процесі төменде қарастырылады. Көмірдің белгілі бір ауа мөлшерінің берілуімен жануы бірнеше этаптан өтеді. Көмір шаңы қыздырылған жану камерасына түсіп, белгілі бір температурға дейін құрғатылады. Көмір шаңын ыстық газбен қыздыру 200°C температурасында жүреді, осы аралықта ол термиялық өзгеріске ұшырайды да су, көміртек диоксиді бөлінеді. Температураны 250-325°C дейін көтергенде бөліну ұлғайып, күкіртсутек және басқа да күкірттің органикалық қосылыстары бөлінеді. Температураның әрі қарай ұлғаюы көмірдің органикалық массасының терең ыдырауына әкеліп, сұйық смола және газ тәрізді заттар сутек, аммиак, метан, көміртегі тотығы және азот бөлінеді. Күрделі технологиялық жүйеде отынды жағу процесі есебін жылу-масса алмасу теориясы негізінде шешуге болады.[1]

Жану камерасында қатты отынды жағу процесіндегі газды ортаның қозғалысы мен үзіліссіздігі:

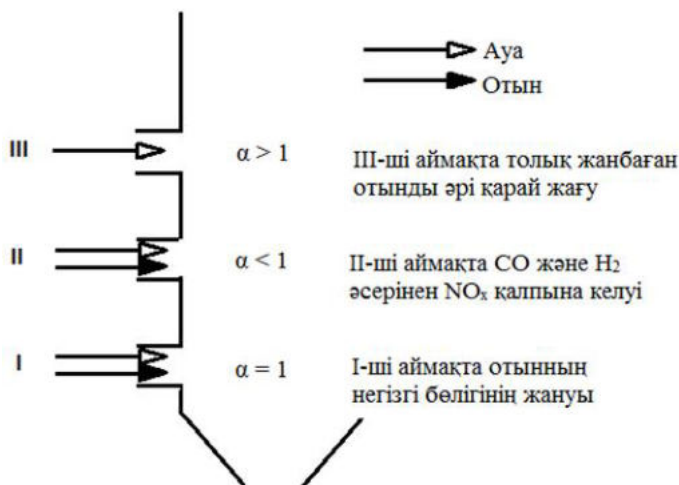
$$\rho \frac{dw}{dr} = \rho F - grad \left( p + \frac{2}{3} \mu div w \right) + 2 div (\mu \dot{S}) \quad (1)$$

$$\frac{d\rho}{dr} + div \rho w = 0 \quad (2)$$

мұндағы,  $w$  — газдың жылдамдығы;  $F$  — массалық күш;  $\dot{S}$  — деформациялық тензор жылдамдығы;  $\rho$  — тығыздық.

Жану камерасында көмір шаңының ауамен араласып жануы күрделі физика-химиялық процесс. Бұл процесстің математикалық сипаты газды ортаның қозғалысы мен үзіліссіздігі, қатты бөлшектің айнымалы қозғалысы, ауаның газды ортадағы диффузиясы, жеке бөлшектің жануы, көмір шаңының полидисперстігі және жеке бөлшектің жылу алмасуынан құрайтын 7 теңдеулерден тұрады. Осы теңдеулер жүйесін шешу жану камерасы ішіндегі нақты белгілі отынның шарттары үшін оттықтың барлық сипаттамаларын анықтауға мүмкіндік береді.[1]

Жану камерасының активті жану аймағында отын оттегімен байытылған жану аймағы құрылады. Ауа мөлшерінің жетіспеушілігіне байланысты орташа температура отынның және термиялық азот тотықтары мөлшерін азайтуға мүмкіндік береді, ал ол дәстүрлі жануымен салыстырғанда аз. Сурет 1-де үш сатылы жағу схемасы көрсетіледі.



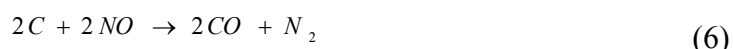
Сурет 1 - Қатты отынды үш сатылы жағу кезіндегі схемасы

Пештің төменгі аймағында (1-аймақ) отынның негізгі бөлігі (90% -ға жуық) артық ауаның ( $\alpha_1 \approx 1$ ) болуымен жағылады, сондықтан отынның жануының соңғы затапында тотықтырғыштың жетіспеушілігімен отынның құрамдас бөлігі  $NO_x$  - азот тотығының төмендеуіне әкеледі. I-ші зона шыға берісінде артық ауа мөлшері  $\alpha_2 \approx 0,9 - 0,95$  тең болатындай II-ші зонада екіншілік отынның жану шарты қалыптастырылады. Нәтижесінде отынның химиялық және механикалық толық жанбауынан газды – тотықты орта түзіледі.

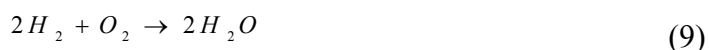
Оттықтың I аймағында болатын реакциялар



Оттықтың II аймағында болатын реакциялар



Оттықтың III аймағында болатын реакциялар



Қарастырып отырған зонада екіншілік отынның жануы кезінде түзілген коксты көміртек I-ші зонадан шыққан азот тотығымен реакцияға түсіп, азот молекуласының қалыптастырады. Пештің жоғарғы III-ші зонасында химиялық және механикалық толық жанбаған отынды әрі қарай жағу үшін үшіншілік ауа беріледі.

Отынды осылайша сатылы жағу оттық ішіндегі максимал температураны төмендетуге мүмкіндік береді, ал температураның төмендеуі азот тотығының термиялық генерациясын төмендетеді. Отын толық жанғанда түзілген кокстік бөлшектер құрамында азот тотығының ыдырау мөлшерін анықтау әдісі жанудың диффузиялы-кинетикалық теориясына негізделген. Азот тотығының ыдырау реакциясы тұрақтысы Аррениус тәуелділігімен сипатталады [2]:

$$k = k_0 \exp(-E / RT) \quad (10)$$

$$k_{C+O_2} = k_0^{C+O_2} \exp(-E_{C+O_2} / RT) \quad (11)$$

$$k_{C+O_2} = 0,68 \exp(-140000 / RT)$$

$$k_{C+NO} = k_0^{C+NO} \exp(-E_{C+NO} / RT) \quad (12)$$

$$k_{C+NO} = 1,18 \cdot 10^4 \exp(-145000 / RT)$$

мұндағы,  $k_0^{C+O_2}$  және  $k_0^{C+NO}$ -экспоненциальды көбейткіштер;  $E_{C+O_2}$  және  $E_{C+NO}$ -рекцияларының энергия активациясы [2].  $C + O_2$  реакциясы үшін экспоненциальды көбейткішті Шестаковтың тәуелділігімен анықталады:

$$\lg(k_0^{C+O_2}) = 0,2 \cdot 10^{-4} E_{C+O_2} + 2 \quad (13)$$

$$\lg(k_0^{C+O_2}) = 0,2 \cdot 10^{-4} \cdot 140000 + 2$$

$C + NO$  реакциясына байланысты экспоненциальды көбейткіш  $k_0^{C+NO} = 1,18 \cdot 10^4$ , ал энергия активациясы  $E_{C+NO} = 145000$  Дж/моль –ға тең (TangBiguang, KazutomoOhtake деректері бойынша) [4].

Оттықтың II-ші зонасында ыдыраған  $NO_{\text{разл}}$  -азот тотығы мөлшері жанғыш кокстік бөлшектер беті ауданын ескеретін төмендегі тәуелділікпен анықталады:

$$NO_{\text{разл}} = 2,5 G_{C+NO} \cdot 12 F \Delta \tau \quad (14)$$

$$NO_{\text{разл}} = 2,5 \cdot 12,17 \cdot 12 \cdot 5,58 \cdot 0,016 = 32,59 \text{ кг}$$

мұндағы  $G_{C+NO}$ - реакция бойынша кокс көміртегінің шығыны,  $\Delta t$ -реакцияның жүру уақыты,  $F$ -кокстік бөлшектер бетінің ауданы.

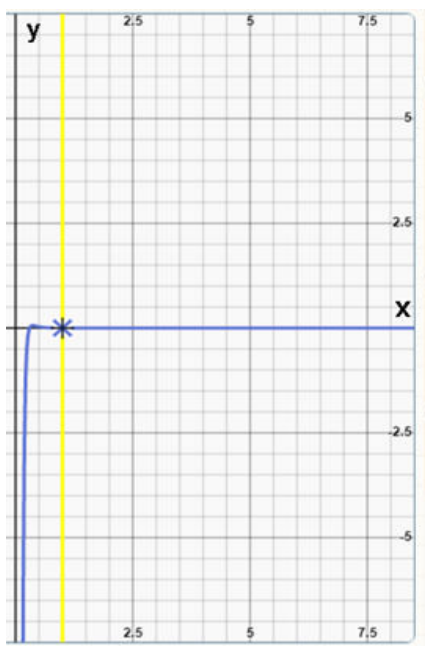
$$G_{C+NO} = \frac{\alpha_D^{C+NO}}{RT} \left( \frac{N_{C+NO}}{1 + N_{C+NO}} \cdot P_{NO \Delta} \right) \quad (15)$$

$$G_{C+NO} = \frac{1,92}{8,31 \cdot 1500} \left( \frac{0,62 \cdot 10^4}{1 + 0,62 \cdot 10^4} \cdot 79 \cdot 10^3 \right) = 12,17 \text{ кмоль} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$$

мұндағы,  $\alpha_D^{C+NO} = \frac{Nu_D \cdot D}{\delta}$ -диффузиялық масса тасымалдау коэффициенті;  $Nu_D$ -диффузиялық Нуссельт критерийі;  $D$ -диффузиялық коэффициент;  $R = 8,314$  Дж/(моль · К)– универсал газ тұрақтысы;  $N_{C+NO} = \frac{k_0^{C+NO}}{\alpha_D^{C+NO}}$  реакцияның диффузия- кинетикалық критерийі;  $P_{NO \Delta}$ - NO парциалды қысым.

$$F = \frac{6 m n}{\rho_k \delta_{01}} \int_{1-x}^1 e^{-m y^n} \frac{(x + y - 1)}{y^3} dy \quad (16)$$

$$\int_{1-x}^1 e^{-m y^n} \frac{(x + y - 1)}{y^3} dy = - \frac{m^{\frac{1}{n}} (\Gamma(-\frac{1}{n} \cdot m y^n) + m^{\frac{1}{n}} (x - 1) \Gamma(-\frac{2}{n} \cdot m y^n))}{n} + C$$



Сурет 2 - Кокстік бөлшектердің  $\Delta y$  функциясы бойынша графигі

$$\int_{1-x}^1 e^{-my^n} \frac{(x+y-1)}{y^3} dy = 0,0607 ;$$

$$F = \frac{6 \cdot 6,9 \cdot 0,8}{1,8 \cdot 0,20} \cdot 0,0607 = 5,58 \text{ м}^2$$

мұндағы,  $\rho_k$ -кокстің тығыздығы;  $x = \delta_1/\delta_{01}$ - ең ірі бөлшектің салыстырмалы өлшемі;  $y = \delta_0/\delta_{01}$ -бастапқы және ең ірі бөлшек өлшемдерінің қатынасы.

А.М. Гурвич және А.Г. Блох ұсынған жану ошағының температурасын оттықтың биіктігі бойынша сипатталады:

$$\theta = (e^{-\alpha z} - A \cdot e^{-\beta z})^{1/4} \quad (17)$$

$$\theta = (e^{-\alpha z} - A \cdot e^{-\beta z})^{1/4} \cdot b_1 + (e^{-\alpha(z-Z_{\max})} - A \cdot e^{-\beta(z-Z_{\max})})^{1/4} \cdot b_2 \quad (18)$$

Жоғарыда келтірілген әдістеме бойынша Екібастұз (2СС) тас көмірін ( $R_{90}=10-15\%$ , ( $\delta_{01\text{осн}}=200$  мкм)) КВТК-100-150 қазандығында сатылы жағу технологиясы бойынша азот тотығы мөлшерін төмендетудің жылулық есептеулері жүргізілген [5].

Азот тотығы мөлшерін төмендетуге әсер ететін ең негізгі фактор температура болып саналады. Температура 1500-ден 2200 К аралығында азот тотығы 10 есе ұлғаяды, сәйкесінше сатылы жағу технологиясы ауа-тотықтырғыш концентрациясын кеміте отырып, отынды төменгі температурада жағуды қарастырады. Осылайша, үш сатылы жануды пайдалану біз үшін атмосфераға зиянды заттардың азот тотығы мен көміртегі диоксиді шығарындыларын азайтудың перспективалық жолдарының бірі. Яғни үш сатылы жанудың әрбір сатысын туралы айтсақ, әдістің бірінші сатысында ауаның артық қолдануымен отынның басты бөлігі жағылады.

Екінші сатыда газ орта құрылады және молекулалық азоттың қалыптасуымен өтеді. Осы орта үшінші сатыға жеткенде  $CO$  және  $H_2$  үшіншілік ауа арқылы жағылады. Нәтижесінде  $NO_x$ -тің төмендеуіне алып келеді. Жылу электр станцияларының жану камераларында әр түрлі отынды жағу кезінде пайдаланылуы мүмкін. Азот оксидтерінің шығарындыларының сатылы отынның жануымен төмендеуі орта есеппен: көмір жағу кезінде - 40% дейін, мазутты жағу кезінде - 35% дейін, табиғи газды жағу кезінде - 45% дейін. Сондықтан үш сатылы жану әдісін қолдану өндіріс үшін тиімді деп есептеуге болады.

### Қолданылған әдебиеттер тізімі

- 1 Хзмалян Д., Каган Я. Теория горения и топочные устройства. –М: Энергия, 1976.– 484с.
- 2 Основы практической теории горения: Учебное пособие для вузов / В.В. Померанцев, К.М.Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др.; Под ред. В.В. Померанцева. 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
- 3 Zeldovich J. The oxidation of Nitrogen in combustions and explosions // Acta Physicochemica. –1946. –Vol.21. –P.557
- 4 Tang B.G., Ohtake K. Computer simulation of NO formation in pulverized coal combustion // International symposium on coal combustion (7 – 10 sept. 1987): China, 1987 - S. 1
- 5 Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 209 с.