

UNE MODÉLISATION PHYSICO-MATHEMATIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA PHASE D'ALLUMAGE D'UNE COUCHE DE COMBUSTIBLE SOLIDE

Nicolae N. ANTONESCU, Dan Paul STANESCU,
Nicolae ANTONESCU

UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII, București

email - nicolae_antonescu@yahoo.com

Abstract: Physical-mathematical and experimental modelling of solid fuel layer ignition in boiler furnaces. The experimental researches highlighted a convective-radiative ignition process in the solid fuel layer of a gasification boiler. The importance of the ignition process for the massic burning rate imposed the elaboration of a gasodynamic and thermodynamic model for the convective ignition, further validated by experimental works by the means of direct visualization and photographic documentation of the process on pilot installation. The hot gases upstream flow speed was determined and also the characteristic parameters for the generated ignition, such as ignition time and flow geometry. The physical-mathematical model results are in good agreement with the experimental data obtained, by this the model being validated. The results are applicable in the optimization of the bunker and furnace zones for the gasification boilers, leading to higher thermal efficiencies and lower pollutant emissions in both domestic and industrial applications.

Key words: biomass, combustion, ignition, modeling.

Rezumat. Cercetările experimentale au evidențiat un proces de aprindere radiant-convectiv al stratului de combustibil în arderea cu gazeificare a maselor lemnoase. Importanța procesului de aprindere în determinarea vitezei masice de ardere a stratului de combustibil a impus elaborarea unui model termo-gazodinamic al convecției în focar, cât și verificare experimentală prin sincro-fotografiere a procesului într-un pilot cu vizualizare. S-au putut determina astfel viteza medie de circulație pe verticală a jetului de gaze fierbinți de aprindere și perioada de inițiere de aprindere a masivelor în contact cu gazele de aprindere. Modelul fizico-matematic care descrie procesul de aprindere este în bună concordanță cu rezultatele experimentale. Cercetările au o importanță latură aplicativă prin stabilirea sistemelor optime de construire a cazanelor de încălzire centrală și industriale cu combustibil solid și stabilirea unor metode optime de conducere a procesului de ardere pentru ridicarea eficienței termice și reducerea poluării mediului.

1. Introduction

Les recherches antérieures [1] ont mis en évidence un processus d'allumage radiant convectif de la couche de combustible dans la combustion avec gazéification des masses de bois.

Les recherches ont une haute importance applicative pour l'établissement des solutions optimales dans la construction des chaudières de chauffage pour bâtiments et industrielles avec du combustible solide et l'établissement d'une méthode optimale de diriger le processus de combustion pour obtenir une haute efficacité thermique et la réduction de la pollution atmosphérique [2], [3].

L'importance du processus d'allumage pour établir la vitesse de combustion de la couche de combustible dans la chaudière a déterminé la nécessité de continuer les recherches, autant par l'élaboration d'un modèle thermo-gazodynamique de la convection dans le foyer que par la vérification expérimentale par synchronographie du processus dans un foyer avec visualisation [4].

2. La théorie de l'allumage convectif de la couche de bois en régime de gazéification- cokéfaction

Au moyen d'une installation expérimentale présentée dans la fig. 1 on a fait la visualisation de l'allumage de la couche de bois en régime de gazéification- cokéfaction.

Le pilote est, à une échelle réduite, une installation réelle de combustion du bois dans un processus de gazéification. Il se compose d'un bunker pour le bois, dans lequel on peut déposer les morceaux de bois soit en vrac, soit d'une manière ordonnée, superposée. Dans la partie inférieure, incluant la zone de gazéification, la zone de la buse de passage des gaz vers la chambre de combustion inférieure et la partie supérieure de la chambre de combustion, comme il apparaît dans la figure, on a monté une fenêtre de quartz par laquelle tout le processus peut être visualisé et photographié. Le pilote est prévu, dans sa partie supérieure d'un ventilateur d'insufflation de l'air, avec réglage du débit de l'air par variation de la vitesse de rotation.

La fig.1 présente le schéma de l'installation pilot avec visualisation du processus de combustion et de gazéification.

La technique expérimentale prévoit la photographie de la couche dans des intervalles fixes de temps. Dans les expériences présentées on a fait 200 photos sur une période de 2000 sec, la durée de la combustion de l'entière charge. On a sélectionné les photos dans lesquelles un morceau de bois, non allumé initialement, s'allume et ensuite est brûlé sur toute l'épaisseur, jusqu'à sa disparition complète. On met en évidence la modalité dans laquelle se produit l'allumage inférieur par radiation et celle supérieure par convection des jets de gaz chauds du a une circulation ascendante descendante à l'intérieur de la couche.

La finalité de cet ouvrage est de présenter les aspects expérimentaux du phénomène de l'allumage du bois dans une couche combustible avec une combustion de type gazéification cokéfaction.

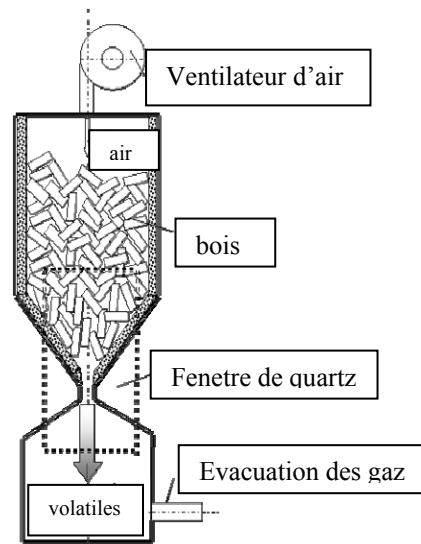


Fig.1. Schéma de l'installation pilot avec visualisation du processus de combustion.

Par rapport à la théorie classique de l'allumage inférieur, par la radiation des couches inférieures de coke sur le combustible supérieur, on vient de constater qu'en réalité l'allumage du bois se fait seulement en faible mesure par radiation conductivité, de proche en proche sur la hauteur de la couche, ce qui explique pourquoi les chiffres de vitesse gravimétrique de combustion ainsi obtenus sont sensiblement inférieurs à celle technique réels. L'allumage principal se fait par un processus de convection de jets de gaz chauds en provenance des couches inférieures du combustible en état de gazéification du coke, à haute température, de l'ordre de 1000 °C. Ces jets de gaz effectuent un mouvement ascensionnel sur une partie de la section de la chambre de réaction. Ensuite, ce jet de gaz est rabattu de nouveau vers le bas par le courant principal d'air de combustion et, dans ce trajet, produit l'allumage des morceaux de bois qui se trouvent sur le trajet. Les séquences du processus d'allumage convectif sont illustrées dans la fig. 2.

- Sur une couche quasi uniforme de coke, de haute température, dans une partie de la section du foyer vient d'apparaître un chenal avec une résistance aérodynamique plus basse ce qui permet l'initiation d'un jet ascensionnel de gaz de haute température.
- Le jet de gaz chauds, après un parcours sur la verticale en haut, est rabattu vers le bas par le courant principal d'air qui vient de haut en bas.
- Le courant de gaz chauds, maintenant dans un trajet descendant, crée les conditions d'allumage des massifs de bois non allumés qu'il rencontre dans le parcours de ce mouvement descendant.
- La combustion des massifs allumés de haut en bas se déroule conformément au modèle classique de la combustion directe du bois.

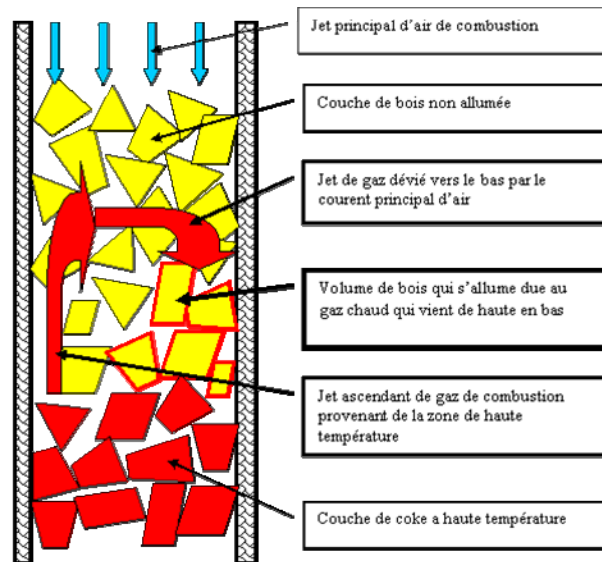


Fig.2 Processus d'allumage convectif de la couche

Ce phénomène d'allumage de petits volumes de matériel non brûlé, apparaît comme un model *Scelkin* d'allumage.

LE MODEL HYDRODYNAMIQUE DE LA CIRCULATION

Le phénomène d'allumage analysé peut être assimilé à un trajet clos de circulation. Le schéma est présenté dans la fig.3.

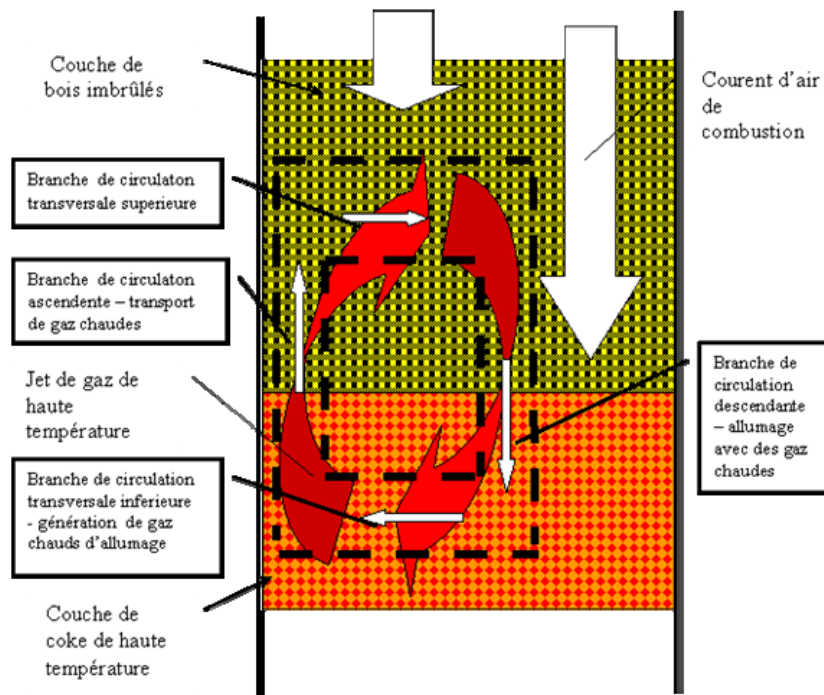


fig.3 Schéma du processus de circulation

L'équation du circuit de circulation des gaz d'allumage est une équation d'équilibre de pressions: la différence de pression statique, entre la pression statique de la colonne descendante Δp_{std} et la pression statique de la colonne ascendante Δp_{sta} , qui est le moteur de la circulation, doit être égale à la somme des pertes de charge due à l'écoulement dans le circuit $\Sigma \Delta p_d$ avec les indices a pour la branche ascendante, d pour la branche descendante, h pour la branche horizontale supérieure, b pour la branche horizontale inférieure.

$$(1) \quad \Delta p_{std} - \Delta p_{sta} = \Delta p_{da} + \Delta p_{dh} + \Delta p_{db} + \Delta p_{dd}$$

Le terme $\Delta p_{std} - \Delta p_{sta}$ représente une différence de pression motrice (de type tirage d'une conduite verticale de gaz chauds) et a l'expression :

$$(2) \quad \Delta p_{std} - \Delta p_{sta} = H_{ad} \cdot (\rho_d - \rho_a) \cdot g$$

Où H_{ad} est la hauteur du canal vertical de gaz, $(\rho_d - \rho_a)$ la différence de densité des gaz du trajet descendant, d'une température plus basse, et celui ascendant, d'une température plus haute et g l'accélération gravitationnelle.

Pour une température ascendante moyenne de 1000 °C et celle descendante de 600 °C il en résulte $\rho_d = 0.409$ kg/m³ et $\rho_a = 0.2805$ kg/m³. Pour une hauteur active de circulation H_{ad} de 100 mm : $\Delta p_{std} - \Delta p_{sta} = 0,126$ Pa

Le terme $\sum \Delta p_d$ représente la perte de charge dynamique du trajet de circulation à travers les couches de bois parcourues, de type perte de charge dans des couches non homogènes et irrégulières dans un trajet de gaz.

Pour de tels trajets, avec des corps d'une taille de 2 à 65 mm, une relation largement acceptée est celle d'Emersleben pour le coefficient de résistance locale par unité de trajet parcouru :

$$(3) \quad \xi = \frac{36,8}{Re} + \frac{12,5}{Re^{0,5}} + 0,745$$

La relation générale de calcul pour la perte de charge dynamique (de type locale car il n'y a pas de trajets libres) est :

$$(4) \quad \frac{\Delta p_d}{H_{ad}} = \frac{\xi \cdot w^2 \cdot \rho}{2}$$

Pour H_{ad} on accepte, conformément à la détermination visuelle, approximativement 0.1 m.

La vitesse est l'inconnue de l'équation. Le calcul se fait dans les conditions suivantes :

- si on accepte que la vitesse soit constante sur tout le trajet, la section d'écoulement est variable en fonction de la température des gaz sur les différentes parties du trajet ;
- si on accepte que la section d'écoulement soit constante alors la vitesse massique dans le circuit est

constante. Si la masse circulante est constante il en résulte que $\frac{G}{\rho} = w \cdot S$ donc $w \cdot \rho = \text{const.}$

LE CALCUL DE LA VITESSE DANS L'HYPOTHÈSE QUE LA VITESSE EST CONSTANTE DANS LE CIRCUIT

Les pertes de charges dynamiques sont mises sous la forme d'une relation dépendante de la vitesse :

$$(5) \quad \sum \Delta p_d = \Delta p_{da} + \Delta p_{dts} + \Delta p_{dd} + \Delta p_{dti}$$

$$(6) \quad \sum \Delta p_d = \frac{\xi \cdot w^2 \cdot H \cdot \rho}{2} = \xi \cdot w^2 \cdot C_2$$

$$(7) \quad \sum \Delta p_d = \left(\frac{36,8}{Re} + \frac{12,5}{Re^{0,5}} + 0,745 \right) \cdot w^2 \cdot C_2$$

$$(8) \quad \sum \Delta p_d = \left(\frac{36,8}{(C_1 \cdot w)} + \frac{12,5}{(C_1 \cdot w)^{0,5}} + 0,745 \right) \cdot w^2 \cdot C_2$$

Les constantes sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Constantes

Calcul de la vitesse dans l'hypothèse que la vitesse est constante dans le circuit	la branche ascendante	la branche transversale supérieure	la branche descendante	la branche transversale inférieure
température t	1000	600	600	1000
densité des gaz ρ	0.2805	0.409	0.409	0.2805
constante C_1	1.72E+02	3.21E+02	3.21E+02	1.72E+02
constante C_2	4.21E-02	6.14E-02	6.14E-02	4.21E-02

Après le calcul des constantes physiques C_1 et C_2 on assemble l'équation par laquelle on détermine l'équation numérique $\sum \Delta p_d$ en fonction de la vitesse.

Pour résoudre l'équation de la circulation (1) on utilise une méthode numérique Newton. Le résultat est : $W = 0.534 \text{ m/s}$

Ce résultat a été vérifié par les moyens visuels et photographiques : les gaz se déplacent dans la zone d'allumage avec cet ordre de grandeur.

LE CALCUL DE LA VITESSE DANS L'HYPOTHÈSE QUE LA VITESSE MASSIQUE EST CONSTANTE DANS LE CIRCUIT

Si la section d'écoulement est constante, alors la vitesse massique dans le circuit est constante. Parce qu'on fait

l'hypothèse que la masse circulante est une constante, il en résulte que $\frac{G}{\rho} = w \cdot S$ et $w \cdot \rho = \text{const.}$

L'équation du circuit aura comme inconnue le produit $w \cdot \rho$ qu'on notera WR .

Mettant en évidence cette inconnue, l'équation des chutes de pression dynamique utilise les constantes présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Constantes

Calcul dans l'hypothèse que la vitesse massique est constante dans le circuit	la branche ascendante	la branche transversale supérieure	la branche descendante	la branche transversale inférieure
température t	1000	600	600	1000
densité des gaz ρ	0.2805	0.409	0.409	0.2805
constante C_1	4.83E+01	1.31E+02	1.31E+02	4.83E+01
constante C_2	5.35E-01	3.67E-01	3.67E-01	5.35E-01

Avec ces constantes on écrit l'équation par laquelle on détermine les pertes de charge dynamiques en fonction de la vitesse massique (1).

Utilisant les constantes physiques C_1 et C_2 on obtient l'équation numérique $\sum \Delta p_d$ en fonction de l'inconnue WR .

$$(9) \quad \sum \Delta p_d = \frac{\xi \cdot w^2 \cdot H \cdot \rho}{2} = C_2 \cdot X \cdot WR^2$$

$$(10) \quad \sum \Delta p_d = \left(\frac{36,8}{C_1 \cdot WR} + \frac{12,5}{(C_1 \cdot WR)^{0,5}} + 0,745 \right) \cdot WR^2 \cdot C_2$$

$$(11) \quad \sum \Delta p_d = f(C_1, C_2, WR)$$

On utilise une méthode numérique Newton. Le résultat est :

$$W \cdot \rho = 0,1186$$

Pour les branches de haute température ($t = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$) $\rho = 0,2805 \text{ kg/m}^3$ et la vitesse obtenue est $W = 0,423 \text{ m/s}$

Pour les branches de basse température ($t = 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$) $\rho = 0,409 \text{ kg/m}^3$ et la vitesse obtenue est $W = 0,290 \text{ m/s}$

Les résultats sont proches des ceux obtenus dans l'hypothèse de vitesse constante. Les résultats sont bien vérifiés par les moyennes visuelles et photographiques.

En conclusion on a pu ainsi déterminer la vitesse moyenne de circulation sur la verticale du jet de gaz chauds qui font l'allumage et la durée de la période d'initialisation de l'allumage des massifs en contact avec ces gaz.

Le modèle physico-mathématique décrivant le processus d'allumage est en bonne concordance avec les résultats expérimentaux.

D'une série de photographies faites à des intervalles de 10 s on a sélectionné quelques régimes caractéristiques qui, pour réduire le nombre de photos illustrant le processus d'allumage ont été présentés dans une base de temps de 120 s.

Dans les photos figures 4...9 on présente un montage de la phase d'allumage.

Dans un moment initial on remarque l'existence d'une délimitation très claire entre la zone de coke et la zone supérieure de matériel non brûlé, pratiquement à la température ambiante. On aperçoit la structure naturelle des morceaux de bois dans la couche. Dans une phase suivante on remarque un courant de gaz chauds circulant vers le haut, qui franchit la couche de bois non enflammée. La pénétration est possible à cause de l'effet fortement ascensionnel des gaz de haute température qui disloquent le courant vertical de haut en bas de l'air qui a une pression dynamique plus basse. La phase suivante de l'allumage convectif est caractérisée par la déviation vers le bas des gaz chauds provenant de la zone de coke. Ce jet entoure les morceaux de bois non allumés de la couche inférieure créant une situation d'allumage convectif supérieur. Plus le jet ascendant a pénétré plus profondément dans la couche de bois, autant la masse de bois allumé en régime d'allumage supérieure sera plus grande.



Fig.4 phase initiale, front de flamme horizontal



Fig.5 apparition d'une dénivellation du front de combustion dans le plan horizontal



Fig.6 apparition d'une circulation verticale ascendante des gaz de combustion



Fig.7 apparition d'une déviation vers le bas des gaz de combustion.



Fig.8 allumage convectif de la couche



Fig.9 stabilisation d'un nouveau front de flamme horizontal

3. Conclusions

Dans le régime de combustion inverse, avec gazéification, la vitesse de combustion de la couche combustible est déterminée **seulement** par la vitesse d'allumage du matériel combustible. La consommation du coke et la gazéification ont un temps de réaction beaucoup plus bas et finalement déterminent seulement l'épaisseur de la couche de coke dans la chambre de combustion.

Le phénomène d'allumage supérieur arrive à une stabilisation dans un régime quasi constant. Les expériences démontrent que l'allumage ne s'emballe pas mais reste à une valeur constante, déterminé par le débit de l'air disponible pour le processus de combustion.

Ainsi on peut expliquer la possibilité de varier la charge thermique de la chambre de combustion en variant le débit de l'air admis. Si la vitesse de combustion aurait été déterminée par la vitesse d'allumage, le réglage du débit calorique serait impossible. Mais si l'allumage peut être n'importe quand activé par l'allumage supérieur convectif il est évident que le débit d'air admis devient le paramètre régulateur.

Les chiffres caractéristiques de charge thermique de la section de la couche, déterminés sur le pilot et sur des chaudières industrielles testées sur L'installation de Certification CE des Chaudières de Chauffage du Laboratoire de Thermodynamique de la Faculté d'Installation de Bucarest ont confirmés le modèle physico-mathématique élaboré.

4. Références

1. Antonescu N. N., Antonescu N., Stănescu D. P.: Visual-Photographic Determination of Burning Speed and Ignition Process in Wood Combustion with Gasification - 9th international conference on heat engines and environmental protection - May 2009 • Balatonfüred, Hungary
2. Spearpoint M. J., Quintiere , Predicting the burning of wood using an integral model. Combustion and Flame, Volume 123, Issue 3, November, 308-325 (2000) .
3. D. Manca, M. Rovaglio A model for oxidative pyrolysis of wood - Combustion and Flame, Volume 156, Issue 8, (August 2009), Pages 1503-1682
4. Di Blasi C., Branca C., Santoro A., Hernandez E.G., Pyrolytic behavior and products of some wood varieties, Combustion and Flame, Volume 124, Issue 1-2, January, 165-177 (2001) .