

## SOME ASPECTS OF HETEROGENEOUS PROCESSES OF THE COMBUSTION INCLUDING TWO PHASES

Antoni Jankowski

Institute of Aeronautics  
Al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa, Poland  
tel.: +48 22 8460011, fax: +48 22 8464432  
e-mail: ajank@ilot.edu.pl

### Abstract

*The combustion of fuels, aside from their state concentrations (solid, liquid, gas), always occur in the gas phase. Next gas phase which is the mixture of the fuel and air or the fuel and oxygen, as well as of the fuel and gases containing oxygen can occurs in the form premixed - homogeneous or not premixed - heterogeneous.*

*Processes of the combustion of liquid fuels and solid are more complicated than combustion of fuel gases. With reference to liquid fuels occur additionally processes of the vaporization of the fuel, and with reference to solid fuels - decomposition of the solid phase with processes of melting and vaporization, pyrolysis, or gasification. This simultaneous and also different influence of different parameters is sometimes a reason of incorrect interpretation of experimental results. The study of the theoretical model of the combustion process concerning of liquid fuels and solid and which then the model takes into account also the gas-phase, because combustion processes take place in this phase and occurs the interaction of the phase gas- and liquid or the solid one. The theoretical model is presented basing on experimental initial researches realized in model with reference to liquid fuels and solid ones. Researches realized in the constant volume chamber with measurements of the pressure during the process of the combustion with the use of quick photography and with measurement of the distribution of the velocity in the spray of the fuel and droplet measurements by means the laser Doppler equipment LDV and PDPA. There were obtained the good agreement of findings experimental researches with the theoretical model. Generally on the combustion velocity of liquid fuels and solid one significant influence has a kind (laminar, temporary and turbulent) and the thickness of the thermal boundary layer.*

## NIEKTÓRE ASPEKTY HETEROGENICZNYCH PROCESÓW SPALANIA OBEJMUJĄCYCH DWIE FAZY

### Streszczenie

*Spalanie paliw, niezależnie od ich stanu skupienia (stałego, ciekłego, gazowego), zawsze występuje w fazie gazowej. Z kolei faza gazowa, którą stanowi mieszanina paliwa i powietrza lub paliwa i tlenu, jak również paliwa i gazów zawierających tlen może występować w postaci przemieszanej - homogenicznej lub nieprzemieszanej - heterogenicznej.*

*Procesy spalania paliw ciekłych i stałych są bardziej złożone niż paliw gazowych. W odniesieniu do paliw ciekłych występują dodatkowo procesy odparowania paliwa, a w odniesieniu do paliw stałych - rozkład fazy stałej z procesami topienia i odparowania, pirolizy, albo gazyfikacji. Jednoczesne i zarazem różne oddziaływanie wielu czynników na procesy spalania jest nieraz powodem błędnej interpretacji wyników badań eksperymentalnych. Opracowano model teoretyczny procesu spalania odnoszącego się do paliw ciekłych i stałych, który to model uwzględnia także fazę gazową, ponieważ same reakcje chemiczne mają miejsce w tej fazie, a ponadto występuje wzajemne oddziaływanie fazy gazowej oraz ciekłej lub stałej. Model teoretyczny jest zaprezentowany w oparciu o wstępne badania eksperymentalne przeprowadzone w warunkach modelowych w odniesieniu do paliw ciekłych i stałych. Badania przeprowadzono w komorze o stałej objętości z pomiarami przebiegu ciśnienia w czasie procesu spalania z zastosowaniem szybkiego fotografowania oraz pomiarami rozkładu prędkości w strudze paliwa i wymiarów kropeł za pomocą laserowej aparatury dopplerowskiej LDV i PDPA. Uzyskano dobrą zgodność wyników badań eksperymentalnych z modelem teoretycznym. Generalnie na prędkość spalania paliw ciekłych i stałych istotny wpływ ma rodzaj (laminarna, przejściowa i turbulentna) i grubość termicznej warstwy przyściennej.*

## 1. Wstęp

Spalanie paliw, niezależnie od ich stanu skupienia (stałego, ciekłego, gazowego), zawsze występuje w fazie gazowej. Z kolei faza gazowa, którą stanowi mieszanina paliwa i powietrza lub paliwa i tlenu, jak również paliwa i gazów zawierających tlen może występować w postaci przemieszanej - homogenicznej lub nieprzemieszanej - heterogenicznej. W pierwszej sytuacji przebieg procesów spalania kontroluje kinetyka reakcji chemicznych, gdzie prędkość spalania zależy głównie od rodzaju i koncentracji substratów, temperatury oraz ciśnienia. W fazie gazowej występuje wiele reakcji chemicznych (mają tu miejsce reakcje wielostopniowe), ale reakcją kontrolującą procesy spalania jest reakcja przebiegająca najwolniej. W drugiej sytuacji na przebieg procesów spalania wpływają także procesy dyfuzji, które zazwyczaj przebiegają wolniej niż reakcje chemiczne, a więc spełniają w procesach spalania rolę czynnika kontrolującego te procesy. Pierwsza sytuacja jest przedmiotem zainteresowania głównie chemików, druga ze względu na oddziaływanie prędkości strugi gazów i rodzaju przepływu, znajduje się głównie w zakresie zainteresowania mechaników.

## 2. Analiza stanu wiedzy w zakresie procesów spalania

Problematyka procesów spalania jest przedmiotem licznych badań teoretycznych i doświadczalnych. Co dwa lata odbywają się światowe Sympozja Spalania z publikacjami liczącymi kilka tysięcy stron. Należy jednak zauważyć, że około 90% (w Polsce ponad 95%) energii uzyskiwana jest z procesów spalania paliw stałych, ciekłych i gazowych, a ponadto procesy spalania związane są także niepożądanymi zjawiskami jak pożary. Istnieje analogia między procesami spalania w silnikach spalinowych a rozprzestrzenianiem się pożarów lasów. W tej dziedzinie prowadzone są liczne prace teoretyczne i doświadczalne, przy tym jednak przeprowadzone badania warstwy przyściennej z dodawaniem masy i reakcjami chemicznymi, założenia o jednoczesnym wpływie prędkości strugi paliwa i ciśnienia są oryginalne, jak również oddziaływanie rodzaju strugi gazów laminarnej, przejściowej i turbulentnej. Istniejące dane literaturowe wskazują, że jedynie turbulentna struga gazów o dużej prędkości wpływa na procesy spalania, co spowodowane jest jednoczesnym oddziaływaniem zarówno strugi gazów, jak i ciśnienia, gdzie wpływ ciśnienia a zwłaszcza jego zmiany niwelują oddziaływanie laminarnej strugi gazów. Aktualna literatura prezentująca stan wiedzy w danym przedmiocie odnosząca się do procesów spalania paliw ciekłych wymieniona jest w pozycjach [1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 14], stan wiedzy odnoszący się do procesów spalania paliw stałych zawierają pozycje [6, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18], a pozycje [7 i 8] dotyczą procesów spalania paliw ciekłych i stałych.

Reasumując, utarte poglądy o braku oddziaływania laminarnej i przejściowej warstwy przyściennej na procesy spalania wynikające z jednoczesnego oddziaływania strugi gazów weryfikuje proponowany model, co ma istotne znaczenie zwłaszcza dla procesów spalania sadzy w konwertorach katalitycznych, gdzie występuje laminarna struga gazów. Uwzględnienie jednoczesnego wpływu prędkości i ciśnienia pozwoli na efektywniejsze projektowanie generatorów gazów w poduszkach powietrznych samochodów oraz wyrzutni foteli samolotów. Propozycja warstwy przyściennej odniesiona do paliw ciekłych jest oryginalna i odnosi się do bezpośredniego wtrysku paliwa w silnikach wysokoprężnych, jak również silników z zapłonem iskrowym oraz do spalania ładunków uwarstwionych.

## 3. Wprowadzenie w zagadnienie

Procesy spalania paliw ciekłych i stałych są bardziej złożone niż paliw gazowych. W odniesieniu do paliw ciekłych występują dodatkowo procesy odparowania paliwa, a w odniesieniu do paliw stałych - rozkład fazy stałej z procesami topienia i odparowania, pirolizy, albo gazyfikacji. Należy podkreślić, że procesy odparowania, topienia, pirolizy i

gazyfikacji wymagają dużej ilości ciepła, przebiegają wolniej niż procesy w fazie gazowej. Trzeba podkreślić, że wpływ ciśnienia gazów na procesy spalania paliw ciekłych i stałych, gdzie procesami kontrolującymi są procesy rozkładu tych faz, jest bardziej złożony i zasadniczo różni się od oddziaływania ciśnienia na procesy spalania paliw gazowych. Oddziaływanie to charakteryzuje się tym, że zwiększenie ciśnienia zmniejsza intensywność rozkładu zarówno fazy ciekłej, jak i stałej. W celu przeciwdziałania takiemu wpływowi ciśnienia poszukuje się nowych metod i sposobów w celu intensyfikacji rozkładu tych faz. Należą do nich między innymi zmniejszenie wymiarów kropeł paliwa poprzez zwiększenie ciśnienia i prędkości strugi rozpylonego paliwa (tzw. system "common rail"), jak również turbulizacja strugi gazów w silniku spalinowym. Uzyskać można także poprawę rozpylenia paliwa poprzez zastosowanie dodatkowej strugi powietrza skierowanej na strugę rozpylonego paliwa (system ORBITAL), jak również zastosować dodatkowe rozpylenie mechaniczne przy wykorzystaniu ścianek komory spalania połączone z turbulizacją strugi gazów. Można także użyć specjalnych urządzeń, które realizują proces rozpylenia paliwa na drodze oddziaływania stałych ścianek i uniezależniają proces wtrysku paliwa od położenia tłoka w silniku spalinowym. Ten ostatni sposób można zastosować także nie tylko przy wtrysku paliwa bezpośrednio do komory spalania, ale także przy wtrysku paliwa do układu dolotowego silnika z zapłonem iskrowym.

Należy podkreślić, że prędkość strugi gazów i jej rodzaj, który może być laminarny, przejściowy lub turbulentny, mają istotny wpływ na procesy spalania paliw ciekłych i stałych, przy czym zawsze występuje oddziaływanie ciśnienia, które wymusza ruch strugi gazów. Jednoczesny wpływ ciśnienia, prędkości i rodzaju strugi gazów na przebieg procesów spalania jest przedmiotem badań wielu autorów. To jednoczesne i zarazem różne oddziaływanie jest nieraz powodem błędnej interpretacji wyników badań eksperymentalnych. Opracowano model teoretyczny procesu spalania odnoszący się do paliw ciekłych stałych, który to model uwzględnia także fazę gazową, ponieważ same reakcje chemiczne mają miejsce w tej fazie, a ponadto występuje wzajemne oddziaływanie fazy gazowej oraz ciekłej lub stałej. Model teoretyczny jest zaprezentowany w oparciu o wstępne badania eksperymentalne przeprowadzone w warunkach modelowych w odniesieniu do paliw ciekłych i stałych. Badania przeprowadzono w komorze o stałej objętości z pomiarami przebiegu ciśnienia w czasie procesu spalania z zastosowaniem szybkiego fotografowania oraz pomiarami rozkładu prędkości w strudze paliwa i wymiarów kropeł za pomocą laserowej aparatury dopplerowskiej LDV i PDPA. Pozwoliło to na dokładne pomiary prędkości spalania w funkcji prędkości i rodzaju strugi gazów w komorze wizualizacyjnej przy rejestracji strefy spalania za pomocą szybkiego fotografowania. W tych badaniach, co jest bardzo ważne, został zminimalizowany wpływ zmian ciśnienia, które zawsze zniekształcają obraz zjawiska badanego w komorze o stałej objętości lub w silniku spalinowym. Przeprowadzone wstępne badania warstwy przyściennej za pomocą laserowej dopplerowskiej aparatury LDV pozwalają na pomiary rozkładu prędkości w tej warstwie przy dodawaniu masy, co odzwierciedla procesy rozkładu zarówno paliw ciekłych, jak i stałych.

#### **4. Założenia modelu teoretycznego spalania**

Założenia modelu teoretycznego są następujące odnoszące się do uogólnionych procesów spalania są następujące:

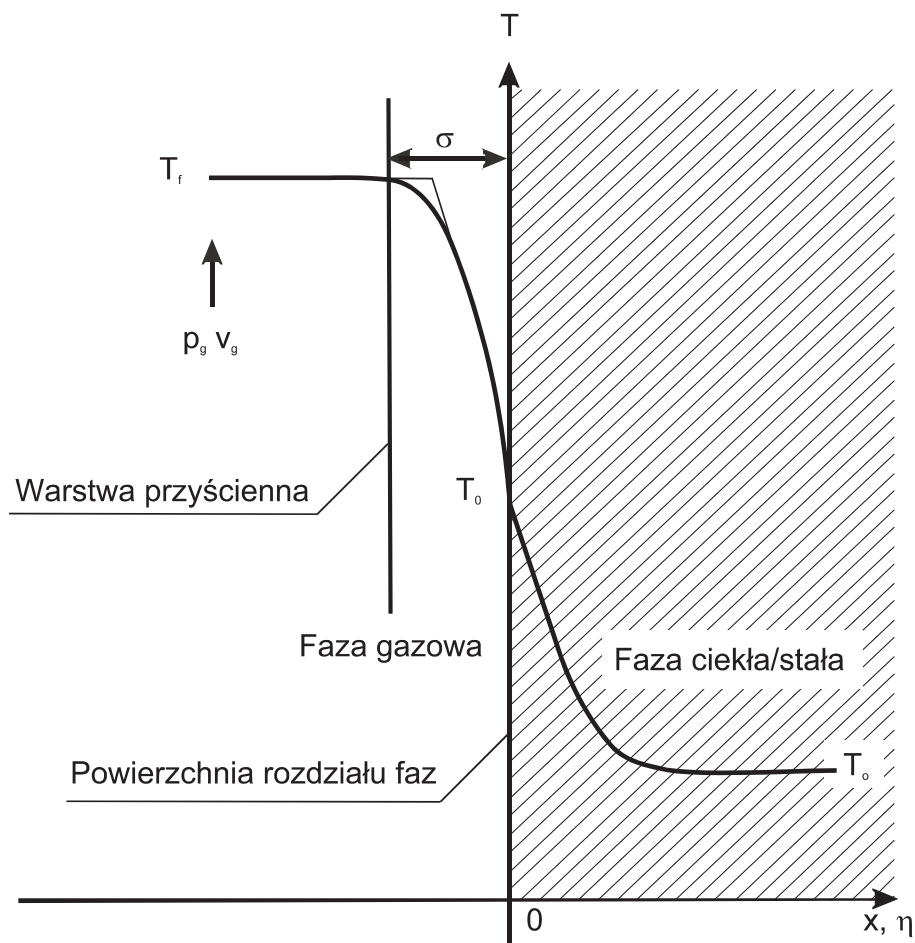
- istnieje wzajemne oddziaływanie fazy gazowej i ciekłej lub stałej, z tym że oba oddziaływania z punktu widzenia mechanizmu procesu są takie same,
- procesami kontrolującymi procesy spalania są procesy przebiegające najwolniej,
- w odniesieniu do paliw ciekłych i stałych procesami przebiegającymi najwolniej będą procesy rozkładu tych faz,

- pod pojęciem rozkładu należy rozumieć odparowanie fazy ciekłej oraz topienie i odparowanie lub pirolizę, albo gazyfikację fazy stałej,
- procesy spalania paliw ciekłych i stałych zależą od warstwy przyściennej, która z kolei zależy od prędkości i charakteru przepływu strugi spalin (laminarny, przejściowy, turbulentny),
- prędkość strugi gazów intensyfikuje procesy spalania,
- prędkość i rodzaj strugi gazów wpływa na grubość warstwy przyściennej,
- wpływ ciśnienia na procesy spalania paliw ciekłych i gazowych jest złożony, związany z oddziaływaniem prędkości strugi gazów oraz zależy także od rodzaju paliwa,
- zwiększenie ciśnienia intensyfikuje procesy spalania w fazie gazowej, ale jednocześnie utrudnia procesy rozkładu fazy ciekłej i stałej, które kontrolują procesy spalania w odniesieniu do tych paliw,
- z kolei zwiększenie ciśnienia powoduje zmniejszenie odległości czoła płomienia od powierzchni paliwa, co zwiększa strumień ciepła dostarczanego do powierzchni paliwa i intensyfikuje proces rozkładu paliwa,
- intensyfikacja procesu rozkładu paliwa związana ze zwiększeniem ciśnienia oddala czoło płomienia od powierzchni paliwa, przy czym mogą wystąpić trzy sytuacje,
- jeżeli w rezultacie przeciwnego oddziaływania ciśnienia i rozkładu fazy ciekłej lub stałej czoło płomienia zbliża się do powierzchni paliwa, to ze zwiększeniem ciśnienia następuje intensyfikacja procesów spalania,
- jeżeli w rezultacie przeciwnego oddziaływania ciśnienia i rozkładu fazy ciekłej lub stałej czoło płomienia oddala się do powierzchni paliwa, to ze zwiększeniem ciśnienia następuje zmniejszenie prędkości spalania,
- jeżeli w rezultacie przeciwnego oddziaływania ciśnienia i rozkładu fazy ciekłej lub stałej czoło płomienia pozostaje w tej samej odległości od powierzchni paliwa, to nie obserwuje się oddziaływania ciśnienia na przebieg procesów spalania,
- najczęściej ma miejsce sytuacja pierwsza, a więc ze zwiększeniem ciśnienia występuje intensyfikacja procesów spalania, chociaż nie tak istotna jak w wypadku spalania paliw gazowych,
- jeżeli mają miejsce reakcje chemiczne w fazie stałej lub ciekłej, to na te procesy ciśnienie nie ma wpływu,
- odzwierciedleniem zjawisk występujących w spalaniu paliw stałych i ciekłych jest warstwa przyścienna z prostopadłym do powierzchni podziału faz dodawaniem masy.

Problematyka odnosi się głównie do procesów spalania w odniesieniu do, które występują w czasie dopalania sadzy w konwerterach katalitycznych silników wysokoprężnych oraz generatorów gazów w poduszkach powietrznych i wyrzutniach foteli samolotów, a więc ma znaczenie związane zarówno z emisją zanieczyszczeń, jak również z bezpieczeństwem eksploatacji pojazdów samochodowych i samolotów.

Problematyk odnosi się też do procesów spalania w silnikach wysokoprężnych z wtryskiem bezpośrednim, w tym z układem wtryskowym "common rail" oraz do silników z zapłonem iskrowym z wtryskiem bezpośrednim i związany jest z emisją zanieczyszczeń motoryzacyjnych. Badania wstępne zostały przeprowadzone w oparciu o oryginalne metodyki badań pozwalające na dokładne pomiary prędkości spalania za pomocą szybkiego fotografowania oraz pomiarów rozkładu prędkości za pomocą laserowego dopplerowskiego analizatora LDV i PDPA. Badania przeprowadzono w komorze o stałej objętości z wykorzystaniem oryginalnego urządzenia do uzyskiwania dużego rozdrobnienia strugi paliwa za pomocą oddziaływania mechanicznego na wtryskiwaną strugę, co powoli uzyskać istotne rozdrobnienie przy niskich ciśnieniach wtrysku. Pozwala to też uzyskać spalanie paliw ciekłych w komorze o stałej objętości bez jej podgrzewania, co nie było dotychczas możliwe

bez zastosowania oryginalnego urządzenia do rozpylania paliwa. Model teoretyczny heterogenicznych procesów spalania z uwzględnieniem dwu faz przedstawiono na Rys. 1.



Rys. 1. Model teoretyczny heterogenicznych procesów spalania z uwzględnieniem dwu faz  
 Fig.1. The theoretical model of heterogeneous combustion processes with the regard of two phases

## 5. Model matematyczny procesów spalania paliw heterogenicznych obejmujących dwie fazy

### 5. 1. Model uproszczony

Większość dotychczasowych modeli dotyczących spalania paliw ciekłych (stałych) zakłada, że paliwo jest jednorodne, spalanie ma charakter ustalony, temperatura na powierzchni rozdziału faz jest temperaturą wrzenia cieczy. Pomija się przy tym wpływ promieniowania, dyfuzji, zmian ciśnienia, zmian parametrów fizycznych i chemicznych paliwa i utleniacza (powietrza, spalin). Rozróżnia się przy tym dwie sytuacje: spalania w warunkach braku konwekcji (w warunkach mikrograwitacji) oraz w warunkach występowania konwekcji, grawitacji ziemskiej. Są to więc modele bardzo uproszczone, jednak dają pewien pogląd o procesach przebiegających w warunkach idealnych. Równanie bilansu cieplnego dla pojedynczej kropli w warunkach idealnych opisany jest zależnością:

$$r^2 \frac{d}{dr} \left( \lambda \frac{dT}{dr} \right) + 2r \lambda \frac{dT}{dr} - \frac{\dot{m}_0 h_s}{4\pi} \frac{d(c_{pg} T)}{dr} = 0. \quad (1)$$

Przy założeniu stałych wartości  $\lambda$  oraz  $c_{pg}$  można otrzymać zależność na rozkład temperatury w fazie gazowej strefy spalania:

$$\frac{T_f - T}{T_f - T_0} = \frac{\exp\left(-\frac{\dot{m} c_{pg} r_s}{4 \pi \lambda r_0 r_f}\right) - \exp\left(-\frac{\dot{m} c_{pg} r_s}{4 \pi \lambda r_0 r}\right)}{\exp\left(-\frac{\dot{m} c_{pg} r_s}{4 \pi \lambda r_0 r_f}\right) - \exp\left(-\frac{\dot{m} c_{pg} r_s}{4 \pi \lambda r_0}\right)} \quad (2)$$

Przy założeniu, że w fazie stałej nie występują żadne reakcje chemiczne, bilans energii można zapisać w postaci:

$$\dot{m} h_s = 4 \pi \lambda r_s \left(\frac{dT}{dr}\right)_{r=r_s} \quad (3)$$

Rozwiązanie równań (2) i (3) pozwala na uzyskanie następującej zależności na masową prędkość spalania  $\dot{m}$  kropli:

$$\dot{m} = \frac{4 \pi r_w \lambda}{c_{pg} (r_f - r_w)} \ln \left[ 1 + \frac{\lambda_w c_{pg}}{\lambda h} (T_f - T_w) \right] \quad (4)$$

Z drugiej strony masowa prędkość spalania związana jest ze zmniejszeniem wymiaru kropli, co opisuje prosta zależność:

$$\dot{m} = -4 \pi r_w^2 \rho_w \frac{dr_w}{dt} \quad (5)$$

Przy dodatkowych założeniach upraszczających polegających na przyjęciu, że stosunek promienia płomienia do promienia kropli jest stały oraz wprowadzając zamiast promienia średnicę kropli paliwa oraz przy założeniu, że masowa prędkość spalania jest proporcjonalna do masowej prędkości spalania otrzymuje się następującą zależność określającą zmianę średnicy w czasie spalania:

$$d^2 = d_0^2 - k t \quad (6)$$

Zależność (6) jest powszechnie stosowaną dotychczas zależnością określającą prędkość spalania kropli paliwa. Warto podkreślić, że stała prędkości spalania kropli zawiera się w wąskim przedziale i jej przybliżona wartość przy spalaniu kropli w powietrzu wynosi około  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .

## 5. 2. Model matematyczny procesów spalania

Model matematyczny uwzględnia procesy występujące w fazie ciekłej i gazowej, w szczególności niejednorodne procesy rozkładu poszczególnych składników fazowych, jak i procesy występujące w fazie gazowej, które oddziałują na procesy rozkładu fazy ciekłej, które odnoszą się do warunków rzeczywistych, gdy spalanie występuje w komorze spalania przy występowaniu wtrysku paliwa do komory w sytuacji, gdy występuję omywanie kropeł strugą gazów. Krople z powodu ich dużej bezwładności w stosunku do strugi gazów nie są unoszone przez strugę gazów i szczególnie w odniesieniu do ruchu turbulentnego występuje duże różnice prędkości strugi gazów i kropeł. Jeżeli prędkość rozkładu kropeł z fazy ciekłej do gazowej jest mniejsza niż prędkość spalania, to następuje zgaszenie płomienia. Jednakże zarówno

obserwacje własne, jak i innych autorów wykazują, że prędkość spalania może być istotnie zintensyfikowana przy występowaniu turbulizacji strugi gazów omywających krople.

Opis matematyczny heterogenicznych procesów spalania przedstawiają poniższe zależności:

Prędkości rozkładu poszczególnych składników fazy ciekłej:

$$r_1 = r_2 = \dots = r_{N^s} = r. \quad (7)$$

Masowe natężenie strugi produktów rozkładu fazy ciekłej:

$$\dot{m} = \iiint_v \frac{d\beta}{dt} \rho_s dV. \quad (8)$$

Równanie reakcji chemicznych fazy ciekłej:

$$\sum_{i=1}^{N^s} \nu_{i,k}^s A_i^s \Leftrightarrow \sum_{i=1}^{N^s} \nu_{i,k}^{\prime s} A_i^{\prime s}. \quad (9)$$

Prędkość reakcji chemicznych odniesiona do jednostki objętości fazy ciekłej:

$$w_i^s = W_i^s \sum_{k=1}^{M^s} (\nu_{i,k}^{\prime s} - \nu_{i,k}^s) \prod_{j=1}^{N^s} \left( \rho_s \frac{Y_j^s}{W_j^s} \right)^{\nu_{j,k}^{\prime s}} k_k^s(T), \quad (10)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} i &= 1 \dots N^s, \\ k &= 1 \dots M^s. \end{aligned}$$

Udział masowy produktów rozkładu składnika i:

$$\frac{d\beta_i}{dt} = \frac{w_i}{\rho_s}. \quad (11)$$

Rozkład temperatury w fazie ciekłej określa równanie zachowania energii:

$$\rho_s c_s \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \bar{v}_s \cdot \text{grad } T \right) = \text{div}(\lambda_s \text{ grad } T) + \sum_{i=1}^{N^s} \sum_{k=1}^{M^s} \rho_{i,k}^s, \quad (12)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} \rho_s &= \rho_s [T, w_i (i=1, \dots, N^s)], \\ c_s &= c_s [T, w_i (i=1, \dots, N^s)], \\ \lambda_s &= \lambda_s [T, w_i (i=1, \dots, N^s)]. \end{aligned}$$

Stała prędkości reakcji:

$$k_k^s = B_k^s \exp\left(-\frac{E_s}{R_o T}\right). \quad (13)$$

Objętościowe natężenie źródła ciepła:

$$q_i^s = \sum_{k=1}^{M^s} q_{i,k}^s = w_i^s Q_i^s. \quad (14)$$

Reakcje chemiczne zawsze występują w fazie gazowej. Fazę gazową opisują równania: reakcji chemicznych, szybkości reakcji chemicznych, ciągłości, zachowanie ilości ruchu, zachowanie energii, dyfuzji i stanu.

Równanie reakcji chemicznych fazy gazowej:

$$\sum_{i=1}^{N^g} v'_{i,k} A_i^g \Leftrightarrow \sum_{i=1}^{N^g} v''_{i,k} A_i^g. \quad (15)$$

Równanie prędkości reakcji chemicznych w fazie gazowej:

$$w_i^g = W_i^g \sum_{k=1}^{M^g} (v''_{i,k} - v'_{i,k}) \prod_{j=1}^{N^g} \left( \frac{p_g \frac{Y_j^g}{W_j^g}}{R_o \sum_{j=1}^{N^g} \frac{Y_j^g}{W_j^g}} \right)^{y'_{j,k}} k_k^g(T). \quad (16)$$

Równanie zachowania masy:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \text{div}(\rho_g \bar{v}_g) = 0. \quad (17)$$

Równanie zachowania ilości ruchu:

$$\frac{\partial v_g}{\partial t} + \bar{v}_g \cdot \text{grad} \bar{v}_g = \bar{F}_g + \frac{1}{\rho_g} \text{div} \bar{\tau}, \quad (18)$$

gdzie:

$\bar{\tau}$  – tensor naprężeń, którego składowe przedstawiają zależności (19-24):

$$\tau_{xx} = -p + \mu' \text{div} \bar{v} + 2(\mu + \Delta\mu_v) \frac{\partial v_x}{\partial x}, \quad (19)$$

$$\tau_{yy} = -p + \mu' \text{div} \bar{v} + 2(\mu + \Delta\mu_v) \frac{\partial v_y}{\partial y}, \quad (20)$$

$$\tau_{zz} = -p + \mu' \text{div} \bar{v} + 2(\mu + \Delta\mu_v) \frac{\partial v_z}{\partial z}, \quad (21)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} (\mu + \Delta\mu_v) \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right), \quad (22)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} (\mu + \Delta\mu_v) \left( \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right), \quad (23)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} (\mu + \Delta\mu_v) \left( \frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right), \quad (24)$$

$$\bar{F}_g = \sum_{i=1}^{N^g} Y_i^g f_i^g. \quad (25)$$

Równanie zachowania energii:



$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_g v_g)}{\partial t} + \bar{v}_g \cdot \text{grad}(\rho_g v_g) = \text{div} \left[ (\lambda_g + \Delta \lambda_{gv}) \text{grad} T \right] - \text{div} \left[ \rho_g \sum_{i=1}^{N_g} h_i^g Y_i^g (\bar{v}_{idif}^g + \Delta \bar{v}_{idifv}^g) \right] + \\ - \text{div} \left[ R_o T \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} \left\{ \frac{X_j^g D_{T,i}^g}{W_i^g D_{i,j}^g} \left[ \bar{v}_{idif}^g + \Delta \bar{v}_{idifv}^g - (\bar{v}_{jdif}^g + \Delta \bar{v}_{jdifv}^g) \right] \right\} \right] + \text{div} \bar{v} \cdot \bar{v}_g + \text{div} p_g \bar{v}_g + \sum_{i=1}^{N_g} w_i^g Q_i^g \end{aligned} \quad (26)$$

Prędkość dyfuzji składnika "i"

$$\begin{aligned} \text{grad}(X_i^g) = \sum_{j=1}^{N_g} \frac{X_i^g X_j^g}{D_{ij}^g} \left[ (\bar{v}_{jdif}^g + \Delta \bar{v}_{jdifv}^g) - (\bar{v}_{idif}^g + \Delta \bar{v}_{idifv}^g) \right] + (Y_i^g - X_i^g) \frac{\text{grad} p_g}{p_g} + \\ + \frac{\rho_g}{p_g} \sum_{j=1}^{N_g} Y_i^g Y_j^g (f_i^g - f_j^g) + \sum_{j=1}^{N_g} \frac{X_i X_j}{\rho_g D_{i,j}^g} \left( \frac{D_{T,j}^g}{Y_j^g} - \frac{D_{T,i}^g}{Y_i^g} \right) \frac{\text{grad} T}{T} \end{aligned} \quad (27)$$

Równanie dyfuzji składnika i:

$$\frac{\partial(\rho_g Y_i^g)}{\partial t} + \text{div}(\rho_g Y_i^g \bar{v}_g) = -\text{div} \left[ \rho_g Y_i^g (\bar{v}_{idif}^g + \Delta \bar{v}_{idifv}^g) \right] + w_i^g, \quad (27)$$

gdzie:

$$i=1, \dots, N_g,$$

$$\sum_{i=1}^{N_g} w_i^g = 0,$$

$$\sum_{i=1}^{N_g} \text{div} \left[ \rho_g Y_i^g (\bar{v}_{idif}^g + \Delta \bar{v}_{idifv}^g) \right] = 0.$$

Równanie stanu:

$$p_g = \rho_g R_o \sum_{i=1}^{N_g} \frac{Y_i^g}{W_i^g}. \quad (28)$$

Przyjmując układ współrzędnych związany z powierzchnią spalania trzymujemy zależność dla koncentracji i temperatury:

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} = -r \frac{\partial \beta}{\partial \eta}, \quad (29)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -r \frac{\partial T}{\partial \eta}. \quad (30)$$

Otrzymamy równanie koncentracji i energii:

$$-r \frac{\partial \beta}{\partial \eta} = (1 - \beta) \exp \left( -\frac{E_s}{R_o T} \right). \quad (31)$$

$$-g_s c_s r \frac{dT}{d\eta} = \lambda_s \frac{d^2 T}{d\eta^2} + \rho_s Q_s (1 - \beta) B_s \exp \left( -\frac{E_s}{R_o T} \right). \quad (32)$$

Warunki brzegowe:

$$\eta = \infty, \quad \beta = 0,$$

$$\begin{aligned} \eta = \infty, & \quad T = T_o, \\ \eta = 0, & \quad T = T_w, \\ \eta = 0, & \quad -\lambda_s \frac{dT}{d\eta} \Big|_w = q_g \Big|_w. \end{aligned}$$

Wartość temperatury powierzchni kropli określimy wykorzystując następujący warunek brzegowy na granicy faz ciekłej i gazowej:

$$\eta = 0, \quad -\lambda_s \frac{dT}{d\eta} \Big|_w = q_g \Big|_w.$$

Równanie koncentracji przyjmie następującą postać:

$$\beta = 1 - \exp\left(\frac{B_s}{r}\right) \int_{\eta}^{\infty} \exp\left(\frac{E_s}{R_o T}\right) d\eta. \quad (33)$$

Równanie zachowania energii sprowadzono do równania rozkładu temperatury:

$$T = T_o + \left\{ T_w - T_o + \frac{Q_s}{c_s} \left[ 1 - \frac{E_s}{R_o T_w} \right] \right\} \exp\left(-\frac{\rho_s c_s}{\lambda_s} r \eta\right) + \frac{Q_s}{c_s} \left[ 1 - \frac{E_s}{R_o T} \left( 1 - \frac{T_o}{T_w} \right) \right] \exp\left[ \left( -\frac{\rho_s c_s}{\lambda_s} r \eta \right) \frac{E_s}{R_o T_w} \left( 1 - \frac{T_o}{T_w} \right) \right]. \quad (34)$$

Wyrażenie określające natężenie strumienia masy produktów rozkładu fazy ciekłej:

$$\dot{m} = \int_0^{\infty} (1 - \beta) B_s \exp\left(-\frac{E_s}{R_o T}\right) \rho_s A d\eta. \quad (35)$$

Równanie dla liniowej prędkości rozkładu fazy ciekłej:

$$r = B_s \int_0^{\infty} \exp\left\{ - \left[ \frac{B_s}{r} \int_{\eta}^{\infty} \exp\left(-\frac{E_s}{R_o T}\right) d\eta + \frac{E_s}{R_o T} \right] \right\} d\eta. \quad (36)$$

Natężenie strumienia ciepła odnoszące się do przepływu z dostarczaniem substancji będzie mniejsze od natężenia strumienia ciepła odnoszącego się do przepływu bez takiego dostarczania. Zmniejszenie to zależy od charakteru ruchu.

Grubość warstwy przyściennej  $\sigma$  określono, w odniesieniu do przepływu laminarnego w wyniku rozwiązania równań warstwy przyściennej oraz w odniesieniu do przepływu turbulentnego, na podstawie hipotezy Prandtla o uniwersalnym profilu prędkości, podają zależność:

$$\sigma = \begin{cases} \delta_{ll} = 5 Re_d^{-0,5} Pr^{-0,33} d, & \text{dla } Re_d < Re_{xcr} \\ \delta_{lt} = 33 Re_d^{-0,8} Pr^{-0,33} d, & \text{dla } Re_d > Re_{xcr} \end{cases}. \quad (37)$$

Równanie (38) przedstawia liniową prędkość przemieszczania się powierzchni kropli paliwa w zależności od rodzaju ruchu strugi gazów (laminarna, turbulentna), prędkości, ciśnienia, rodzaju paliwa, temperatury płomienia, wartości opałowej, parametrów fizycznych i chemicznych strugi gazów.

$$r = \begin{cases} r_i = r_o + 0,2 \psi_l Pr^{-0,67} \left( \frac{\mu_g}{R_g T_f} \right)^{0,5} c_{pg} \frac{T_f - T_o}{\rho_s [c_s (T_w - T_{\infty}) - Q_s]} \left( \frac{vp}{d} \right)^{0,5} & \text{dla } Re_d < Re_{dcr} \\ r_i = r_o + 0,03 \psi_l Pr^{-0,67} \frac{\mu_g^{0,2}}{(R_g T_f)^{0,8}} c_{pg} \frac{T_f - T_o}{\rho_s [c_s (T_w - T_{\infty}) - Q_s]} \frac{(vp)^{0,8}}{d^{0,2}} & \text{dla } Re_d > Re_{dcr} \end{cases}, \quad (38)$$

gdzie:

$r_0$  – prędkość rozkładu fazy ciekłej określona w warunkach braku konwekcji z zależności (6).

Przeprowadzone wstępne pomiary grubości warstwy przyściennej w warunkach modelowych przy wykorzystaniu laserowej aparatury LDV wykazały, że istnieje ścisła zależność pomiędzy grubością warstwy przyściennej a prędkością spalania paliw ciekłych, jak również stałych omywanych strugą gazów. Zatem model teoretyczny odnosi się do paliw heterogenicznych, zarówno ciekłych, jak i stałych.

## 6. Wnioski

Z przeprowadzonych badań wstępnych oraz na podstawie opracowanego modelu teoretycznego można sformułować następujące wnioski:

- Prędkość spalania przy występowaniu konwekcji, składowej prędkości gazów paliw ciekłych i stałych zmienia procesy spalania tych paliw.
- Wzrost prędkość strugi zawsze zwiększa prędkość spalania, przy czym charakter oddziaływania zależy od rodzaju przepływu (laminarny, przejściowy, turbulentny).
- Ciśnienie dodatkowo wpływa na składową prędkościową prędkości spalania, przy czym wpływ ten jest różny i zależy głównie od rodzaju i charakterystyk paliwa.
- Zasadniczo zwiększenie ciśnienia zwiększa składową prędkościową prędkości spalania, jednak w odniesieniu do niektórych paliw może następować brak oddziaływania lub nawet zmniejszenie prędkości spalania ze wzrostem ciśnienia.
- Istotny wpływ na proces spalania ma miejsce, co związane jest z rodzajem ruchu spalin i wielkością turbulencji, a przede wszystkim z rodzajem i grubością warstwy przyściennej.
- Generalnie na prędkość spalania paliw ciekłych i stałych istotny wpływ ma rodzaj (laminarna, przejściowa i turbulentna) i grubość termicznej warstwy przyściennej.
- Wnioski odnoszące się do paliw ciekłych - kropel paliwa mogą być wykorzystane do analizy procesów spalania paliw stałych, dopalania cząstek w łapaczach cząstek stałych stosowanych do silników wysokoprężnych.
- Wykonane fotografie warstwy przyściennej potwierdzają założenia o zasadniczym wpływie grubości i rodzaju warstwy przyściennej na procesy spalania paliw stałych i ciekłych.

## Literatura

- [1] Bessler, W. G., Schulz, C., Lee, T., Jeffries, J. B., Hanson, R. K., *Laser-induced fluorescence detection of nitric oxide in high-pressure flames with A-X (0,1) excitation*, Proceedings of the Western States Section of the Combustion Institute, Spring Meeting, Oakland 2001.
- [2] Buckmaster J., Clavin P., Linan A., Matalon M., Peters N., Sivashinsky G., Williams F. A., *Combustion theory and modeling*, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 30, s. 1-19, Pittsburgh 2005.
- [3] Corcione F. E., et al., *Temporal and Spatial Evolution of Radical Species in the Experimental and Numerical Characterization of Diesel Auto-Ignition*, Proceedings of The Fifth International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines (COMODIA 2001), Nagoya 2001.
- [4] Cuoci A., Mehl M., Paratico T., Faravelli T., Ranzi E., *Modeling of the evaporation and combustion of jet fuel droplets under microgravity*, Proceedings of the European Combustion Meeting ECM2005, The Belgian Section of the Combustion Institute, Louvain-la-Neuve 2005.

- [5] Imaoka R. T., Sirignano W. A., *Vaporization and combustion in three-dimensional droplet arrays*, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 30, s. 1981–1989, Pittsburgh 2005.
- [6] Ishihara A., Sakai Y., Konishi K., Andoh E., *Correlation between burning surface temperature and regression rate for polymethylmethacrylate*, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 30, s. 2123–2130, Pittsburgh 2005.
- [7] Jankowski A. *Wybrane problemy procesów spalania paliw obejmujące fazy stałą, ciekłą i gazową*, Referat wygłoszony na Seminarium Naukowym KONES - Napędy i Środki Transportu - Wyzwania XXI Wieku, Rynia 2005.
- [8] Jankowski A., *Wpływ ciśnienia i prędkości strugi na procesy spalania paliw stałych*, II Międzynarodowa Konferencja Naukowa IPOEX 2005, Jaszowiec 2005.
- [9] Kim E. S., Yang V., *Modeling of Nitramine Propellant Combustion and Ignition, Energetic Materials: Initiation, Decomposition and Combustion*, Wyd. P. Politzer, Theoretical and Computational Chemistry Series, Academic Press/Elsevier Science, New York 2003.
- [10] Kimura S., Kosaka H., Himeno R., Matusi Y., *A Numerical Simulation of Diesel Fuel Spray by LES*, Proceedings of The Fifth International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines (COMODIA 2001), Nagoya 2001.
- [11] Knott G., Brewster M. A., *Two-dimensional Model of Composite Propellant Flame Structure and Burning Rate*, AIAA-2000-3460, AIAA Joint Propulsion Conference, Huntsville 2000.
- [12] Konecny P., *Design of Rocket Motor Charged with Solid Propellant Star Grain*, Proceedings of V International Conference, Wyd. WAT, Waplewo 2004.
- [13] Landsbaum E. M., *Erosive Burning of Solid Rocket Propellants - A Revisit*, Journal of Propulsion and Power, Vol. 21, 3, El Segundo 2005.
- [14] Le Clercq P. C., Bellan J., *Modeling of multi component-fuel drop-laden mixing layers having a multitude of species*, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 30, s. 2011-2019, Pittsburgh 2005.
- [15] Lukin A., *Nano-Technologies for Prevention of Combustion Instability at the Large-Sized Solid Propulsion Systems Fire Utilization*, Proceedings of the European Combustion Meeting ECM2005, The Belgian Section of the Combustion Institute. Louvain-la-Neuve, 2005.
- [16] McDonald B. A., Menon S., *Direct Numerical Simulation of Solid Propellant Combustion in Crossflow*, Journal of Propulsion and Power, Vol. 21, 3, El Segundo 2005.
- [17] Parr T., Hanson-Parr, D., *Optical Diagnostics of Solid Propellant Flame Structures, Solid Propellant Chemistry*, Combustion and Motor Interior Ballistics (Wyd. V. Yang, T. Brilland W. Ren), Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 185:381, AIAA, Reston, 2000.
- [18] Smooke M. D., Yetter R. A., Parr T. P., Hanson-Parr D. M., *Experimental and Modeling Studies of Two-Dimensional Ammonium Perchlorate Diffusion Flames*, Proceedings of The Combustion Institute, Vol. 28, s. 839-846, Pittsburgh 2000.

### Wykaz oznaczeń

- A - pole powierzchni spalania,  
 $A'_i$  - substraty,  
 $A''_i$  - produkty reakcji,  
 $B_k$  - współczynnik częstości reakcji "k" w równaniu Arrheniusa,  
 $c_{pg}$  - ciepło właściwe gazów przy stałym ciśnieniu,

$c_s$	- ciepło właściwe fazy stałej,
$d_0$	- początkowa średnica kropli,
$D_{ij}$	- współczynnik wzajemnej dyfuzji składników "i" oraz "j",
$D_{T,i}$	- współczynnik termicznej dyfuzji składnika "i",
$E_k$	- energia aktywacji reakcji "k",
$f_i$	- zewnętrzna siła odniesiona do jednostki masy i do składnika "i",
$h_i$	- entalpia odniesiona do jednostki masy składnika "i",
$h_s$	- ciepło rozkładu fazy ciekłej,
$k$	- stała określająca liniową prędkość rozkładu fazy ciekłej,
$k_k$	- stałą szybkości reakcji "k" określona równaniem Arrheniusa,
$\dot{m}$	- masowe natężenie strugi produktów reakcji rozkładu fazy ciekłej,
$N$	- liczba składników "i" biorących udział w reakcji,
$Nu_d$	- lokalna liczba Nusselta,
$Pr$	- liczba Prandtla,
$p$	- ciśnienie,
$Q_i$	- ciepło rozkładu składnika "i",
$q_k$	- natężenie strumienia ciepła spalin przekazywanego fazie ciekłej,
$R_o$	- uniwersalna stała gazowa,
$R_g$	- stała gazowa gazów,
$Re_d$	- liczba Reynoldsa,
$r$	- liniowa prędkość przemieszczania się powierzchni rozdziału faz,
$r_0$	- liniowa prędkość przemieszczania powierzchni rozdziału faz przy braku konwekcji,
$r_s$	- promień kropli,
$r_0$	- prędkość rozkładu fazy ciekłej określona w warunkach braku konwekcji,
$r_f$	- promień strefy spalania przy braku konwekcji,
$St_{x,o}$	- lokalna liczba Santona,
$T$	- temperatura,
$T_o$	- temperatura na powierzchni rozdziału faz,
$T_g$	- średnia temperatura gazów,
$t$	- czas,
$u_g$	- energia wewnętrzna spalin odniesiona do jednostki masy,
$V$	- objętość obszaru podgrzanego,
$\bar{v}$	- średnia prędkość strugi spalin,
$\bar{v}_g$	- wektor prędkości strugi spalin,
$\bar{v}_s$	- wektor prędkości przemieszczania się granicy faz,
$\bar{v}_{idyf}$	- wektor prędkości dyfuzji składnika "i",
$W_i$	- masa cząsteczkowa składnika "i",
$w_i$	- masowa szybkość reakcji składnika "i" odniesiona do jednostki objętości,
$X_i$	- udział molowy składnika "i",
$Y_i$	- udział masowy składnika "i",
$x,y,z$	- współrzędne w układzie nieruchomym,
$\alpha_x$	- lokalny współczynnik przejmowania ciepła,
$\beta$	- udział masowy produktów rozkładu fazy ciekłej,
$\Delta q_{gx}$	- przyrost natężenia strumienia ciepła przekazywanego fazie ciekłej wywołany ruchem strugi spalin,
$\Delta \bar{v}_{idyf}$	- przyrost wektora prędkości dyfuzji składnika "i" wywołany ruchem strugi gazów,
$\Delta \lambda$	- przyrost współczynnika przewodzenia ciepła wywołany ruchem strugi gazów,
$\Delta \mu_{vg}$	- przyrost współczynnika lepkości dynamicznej wywołany ruchem strugi gazów,
$\delta_{gch}$	- grubość strefy spalania,

- $\xi, \eta, \zeta$  - współrzędne w układzie ruchomym związanym z powierzchnią spalania (w tym  $\eta$  prostopadła do powierzchni spalania),  
 $\lambda$  - współczynnik przewodzenia ciepła,  
 $\mu$  - współczynnik lepkości dynamicznej,  
 $\mu'$  - drugi współczynnik lepkości dynamicznej,  
 $v'_{i,k}$  - współczynnik stechiometryczny składnika "i",  
 $v''_{i,k}$  - współczynnik stechiometryczny składnika "i" będącego produktem w reakcji "k",  
 $\rho$  - gęstość,  
 $\sigma$  - grubość warstwy przyściennej,  
 $\bar{\tau}$  - tensor naprężeń,  
 $\psi$  - współczynnik określający stopień zmniejszenia strumienia ciepła wywołanego dostarczaniem substancji z omywanej powierzchni spalania.

#### Indeksy

- ch - dotyczy reakcji chemicznych,  
 dyf - dotyczy dyfuzji,  
 f - dotyczy płomienia,  
 g - dotyczy fazy gazowej,  
 i - dotyczy składnika "i",  
 j - dotyczy składnika "j",  
 k - dotyczy stopnia reakcji chemicznej w reakcji wielostopniowej,  
 l - dotyczy ruchu laminarnego,  
 o - dotyczy warunków bez dostarczania substancji z powierzchni spalania,  
 s - dotyczy fazy ciekłej,  
 t - dotyczy ruchu turbulentnego,  
 v - dotyczy prędkości strugi,  
 w - dotyczy powierzchni rozdziału faz,

#### Wskaźniki

- ' - dotyczy substratów,  
 " - dotyczy produktów reakcji,  
 g - dotyczy fazy gazowej,  
 s - dotyczy fazy ciekłej.