

Jacek MAĆKOWSKI

EMPIRYCZNE METODY WYZNACZANIA CZASU
POJAWIANIA SIĘ SPALANIA STUKOWEGO

Streszczenie. Znaczenie spalania stukowego w silnikach o zapłonie iskrowym jako czynnika ograniczającego postęp w projektowaniu doceniano już na początku rozwoju przemysłu silnikowego. Pojawianie się spalania stukowego w znacznej mierze ograniczało podniesienie stopnia sprężania do pewnej wartości maksymalnej, co uniemożliwiało osiągnięcie wyższych sprawności teoretycznych. Spalanie stukowe ze względu na powstające fale uderzeniowe prowadzi do wibracji, a chwilowe wysokie temperatury przyczyniają się do zmęczenia materiału.

Ponieważ przyczyną powstawania spalania stukowego może być samozapłon, w pracy podano różne zależności empiryczne umożliwiające obliczenie czasu opóźnienia samozapłonu mieszanek stechiometrycznych. Przeanalizowano również wpływ chwilowych parametrów stanu fizycznego czynnika roboczego biorącego udział w przemianie na rozwój samozapłonu oraz zaproponowano wykorzystanie znacznych zależności empirycznych do określania chwilowej temperatury nie spalonej mieszanki, przyczyniając się w ten sposób do wzrostu dokładności ci dwu lub trójstrefowego modelu zerowymiarowego.

1. Wprowadzenie

Wymagania dotyczące toksyczności spalin i zmniejszenia zużycia paliwa powodują, że zakresy prac występujące w obecności eksploatowanych silników coraz bardziej zbliżają się do wartości, przy których może pojawić się spalanie stukowe. Jedną z przyczyn, która powoduje powstawanie spalania stukowego w silniku o zapłonie iskrowym, jest samozapłon, który jak wiadomo, ze względu na nieporządane skutki powinien zostać wyeliminowany.

Znaczenie samozapłonu w silnikach o zapłonie iskrowym jest czynnikiem znanym od dawna i mimo że znacznie ogranicza postęp w projektowaniu, bowiem wpływ jego jest istotny nie tylko do określenia czasu, po jakim wystąpi, ale również do określenia całej dynamiki spalania, to jednak większość dostępnej autorowi literatury opisuje samo zjawisko lub jego objawy bez wnikania w istotę zagadnienia. Stan ten spowodowany jest złożonym wpływem czynników fizycznych i chemicznych uniemożliwiających w sumie określenie np. opóźnienia samozapłonu na drodze analitycznej. Dlatego, jak dotąd, nie udało się stworzyć dostatecznie dokładnej formuły opartej na modelu teoretycznym, chociaż zakłada się, że względu na charakter zjawisk towarzyszących opóźnieniu samozapłonu, że należałoby wyróżnić w nim oddzielnie wpływ czynników fizycznych i chemicznych.

Obecnie mechanizm zjawiska wyjaśnia się jedynie opierając się na opisie fenomenologicznym. Próbuje się również wyjaśnić go zgodnie z kinetyką reakcji chemicznych uwzględniając wyzwalenie energii w fazie przedpłomiennej. Natomiast czas opóźnienia samozapłonu wyznacza się z znanej zależności empirycznej, w której człon wykładniczy jest funkcją Arrheniusa wyrażającą wpływ temperatury na szybkość reakcji chemicznych.

2. Fenomenologiczny opis zjawiska stuku

Ponieważ w komorze spalania silnika mieszanka nigdy nie bywa jednorodna ani pod względem temperatury ani pod względem składu, więc wstępne przedpłomienne reakcje chemiczne przebiegają niejednakowo w różnych jej obszarach. Jeżeli na skutek wzrostu ciśnienia (najczęściej 3 ... 5 MPa) spowodowanego spalaniem mieszanki palnej, promieniowaniem cieplnym lub koncentracją fali akustycznej nastąpi wzrost temperatury, to w miejscach szczególnie podatnych w pierwszej kolejności, a w pozostałych nieco później mogą zaistnieć warunki sprzyjające powstawaniu ognisk samozapłonu.

W silnikach o zapłonie iskrowym, przy zasilaniu ich paliwami handlowymi, miejscami szczególnie podatnymi do wystąpienia samozapłonu są te obszary, gdzie mieszanka osiągnęła skład $\lambda = 0,8 \dots 0,9$ oraz gdzie przez dostatecznie długi czas temperatura nie spalanej mieszanki utrzymuje się w okolicy 800 ... 1000 K. Jeżeli front płomienia rozchodzący się od iskry świecy zapłonowej na skutek nie sprzyjających warunków spalania lub złej geometrii komory spalania nie zdąży objąć tego niebezpiecznego miejsca, następuje utworzenie nowego frontu płomienia rozprzestrzeniającego się w kierunku przeciwnym z prędkością około 10 razy większą niż czoło płomienia pierwotnego. Następuje dalszy gwałtowny wzrost ciśnienia, który powoduje powstanie następnych ognisk samozapłonu, a spowodowany przez nie przyrost ciśnienia powoduje powstanie fali uderzeniowej, która uderzając o ścianki cylindra zaczyna oscylować z częstotliwością około 5000 ... 7000 Hz; zależną od położenia tłoka względem ZZP [4] lub według nowszych badań, zależną od ilości masy nie spalanej mieszanki [1]. Uderzenia te słyszalne są na zewnątrz różnie, zależnie od intensywności stuku oraz tłumiących własności konstrukcyjnych silnika [8], [9].

3. Próby wyjaśnienia zjawiska na drodze chemicznej

Samozapłon jest zjawiskiem chemicznym, o czym najlepiej świadczy dodanie nawet małych ilości środków inhibitujących, które nie zmieniając parametrów termodynamicznych mieszanki, znacznie zmieniają jej skłonność samozapłonową.

Większość badaczy szuka wytłumaczenia zjawiska stuku na drodze kinetyki reakcji chemicznych. Niestety, w przypadku prób wyjaśnienia zjawiska na drodze chemicznej okazuje się, że kinetyka reakcji chemicznych prowadzących do samozapłonu nawet dla prostych czystych węglowodorów jest sprawą złożoną i nie pozwala obecnie na wyciągnięcie jednoznacznych wniosków. Prowadzone na ten temat prace badawcze, np. w firmie Shell [5], skupiły się na opisie układu chemicznego zawierającego w sumie tylko kilka produktów przejściowych, dając w efekcie układ sześciu równań różniczkowych. Obecnie najbardziej zaawansowane modele stuku są proponowane w pracach [6], [11]. Uwzględnia się w nich pięć reakcji chemicznych opisujących zainicjowanie łańcucha, jego postęp, rozgałęzianie oraz przerywanie. W modelach tych niezbędne dane dotyczące kinetyki reakcji chemicznych zostały uzyskane w drodze dopasowania modelu do wyników badań samozapłonu wykonanych przy użyciu maszyny pojedynczego sprężu, dla różnych paliw. W literaturze krajowej przebieg przedplomiennych reakcji chemicznych występujących w czasie opóźnienia samozapłonu najlepiej przedstawiony jest w pracy M. Zabłockiego [13] i A. Kowalewicza [7].

Jednak ze względu na znaczną liczbę związków, jakie należałoby uwzględnić w procesie spalania, bowiem w paliwie handlowym znajduje się około 200 różnych węglowodorów, nawet najambitniejsi badacze muszą na razie ograniczyć swoje studia do kilku kluczowych reakcji kinetycznych opisujących procesy prowadzące do samozapłonu. Dlatego zrozumiałe jest, że większość badaczy w celu opisania samozapalnych własności danego paliwa ogranicza swój opis do prostego schematu, stosując jedną uogólnioną globalną reakcję kinetyczną. Zakłada się przy tym, że w przypadku braku w paliwie dodatków inhibitujących, kinetyka reakcji jest na tyle duża, że o czasie samozapłonu decydują warunki termodynamiczne panujące w komorze spalania.

4. Literaturowe zależności umożliwiające obliczenie czasu opóźnienia samozapłonu

Reakcje chemiczne prowadzące do samozapłonu wymagają określonego przedziału czasu. Uzależniając czas ten od stanu fizycznego mieszanki zdeteminowanej temperaturą i ciśnieniem oraz chemicznymi własnościami paliwa można określić go następującym równaniem empirycznym

$$\tau = C \cdot p^{-n} \exp\left(\frac{E}{RT}\right)$$

Niedostatkim omawianego równania jest fakt, że ujmuje ono w jednolity sposób zarówno procesy fizyczne, jak i chemiczne. W tym ujęciu o wielkości τ decydują jedynie reakcje chemiczne, które zależą do fizycznych warunków mieszaniny. Dlatego w zależności od warunków badań u różnych badaczy występują znaczne rozbieżności w wartościach poszczególnych parametrów.

E. Rifkin i C. Walcutt [10] opisując czas zajścia reakcji chemicznych τ_1 ¹⁾ prowadzących do samozapłonu badali stechiometryczną mieszankę izooktanu z powietrzem na maszynie, w której żądany stan końcowy osiągnano przez szybkie przesunięcie tłoka. Podana przez nich zależność

$$\tau_1 = 17,095 \cdot 10^{-6} \cdot p^{-1,49} \exp\left(\frac{7457}{T}\right) \text{ [ms]}$$

została wyprowadzona dla ciśnień w zakresie 0,7 ... 3 MPa i temperatur 640 ... 860 K.

W. Burwell i D. Olson [2] otrzymali zależność dla opóźnienia czasu samozapłonu mieszanek izooktanu z powietrzem zmieniając w wąskim zakresie ciśnienie $p = 0,125 \dots 0,20$ MPa i temperatury $T = 850 \dots 900$ K, ale uwzględniając wpływ współczynnika składu powietrza w zakresie $\lambda = 0,5 \dots 2,2$. Otrzymali oni zależność

$$\tau_2 = 0,916 \cdot 10^{-12} \lambda^{-1,04} \cdot p^{-2,52} \exp\left(\frac{32400}{T}\right) \text{ [ms]}$$

z której nie wynika, żeby mieszanka stechiometryczna spalała się najszybciej. Tłumaczą to w ten sposób, że o czasie spalania bardzo silnie decyduje przepływ mieszanki, który ujęli w postaci pierwszej stałej mogącej zmieniać się w znacznych granicach. Tak więc stała ta wymaga każdorazowego dopasowania do aktualnych warunków badań.

D. Vermeer, J. Meyer i A. Oppenheim [12] badali stechiometryczne mieszanki izooktanu z tlenem w obecności argonu. Temperatury sprężania wynosiły 1200 ... 1700 K, natomiast ciśnienia sprężania zmieniały się w zakresie 0,1 ... 0,4 MPa.

Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń dobrali następującą zależność

$$\tau_3 = 10^{-6} \left(\frac{p}{RT}\right)^{-0,72} \exp\left(-9,387 + \frac{16,310}{T}\right) \text{ [ms]}$$

Zakres wysokich temperatur musiano dobrać ze względu na pojawiające się problemy z samozapłonem.

Natomiast A. Dauad i P. Eyzat [3] uwzględnili w swoich doświadczeniach wpływ liczby oktanowej. Opracowana przez nich zależność określająca czas, po jakim pojawia się samozapłon

$$\tau_4 = 19,75 \left(\frac{LO}{100}\right)^{3,4107} p^{-1,7} \exp\left(\frac{2800}{T}\right) \text{ [ms]}$$

¹⁾ W literaturze τ_1 , τ_2 i τ_3 są zarezerwowane dla oznaczenia opóźnienia płomieni zimnych τ_1 , błękitnych τ_2 i gorących τ_3 . W artykule suma tych czasów równa się chemicznemu opóźnieniu samozapłonu. Natomiast indeksy 1, 2 ... 5 oznaczają kolejną zależność.

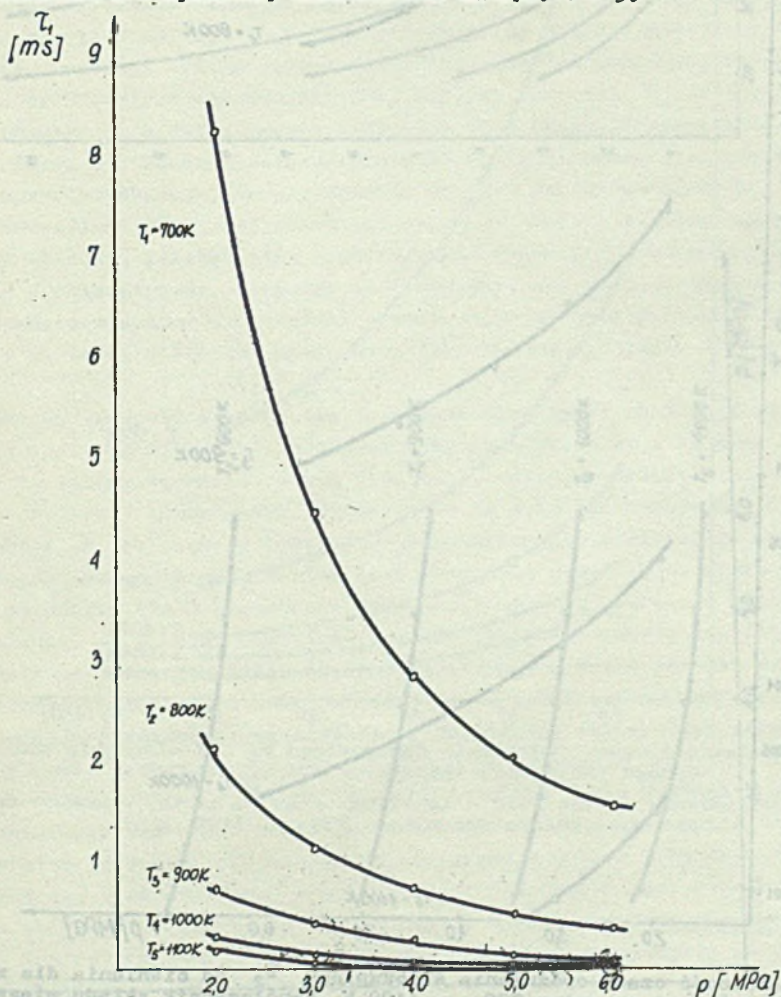
opracowana została w warunkach rzeczywistych. Eksperymenty ich polegały na rejestracji przebiegu ciśnienia spalania silnika o zapłonie iskrowym pracującego ze stukiem.

Ostatnią zależność, którą zdecydowano się zamieścić dla porównania, zaczerpnięto z pracy [7]

$$\tau_5 = 0,44 \cdot 10^{-3} p^{-1,19} \exp\left(\frac{4650}{T}\right) \text{ [ms]}$$

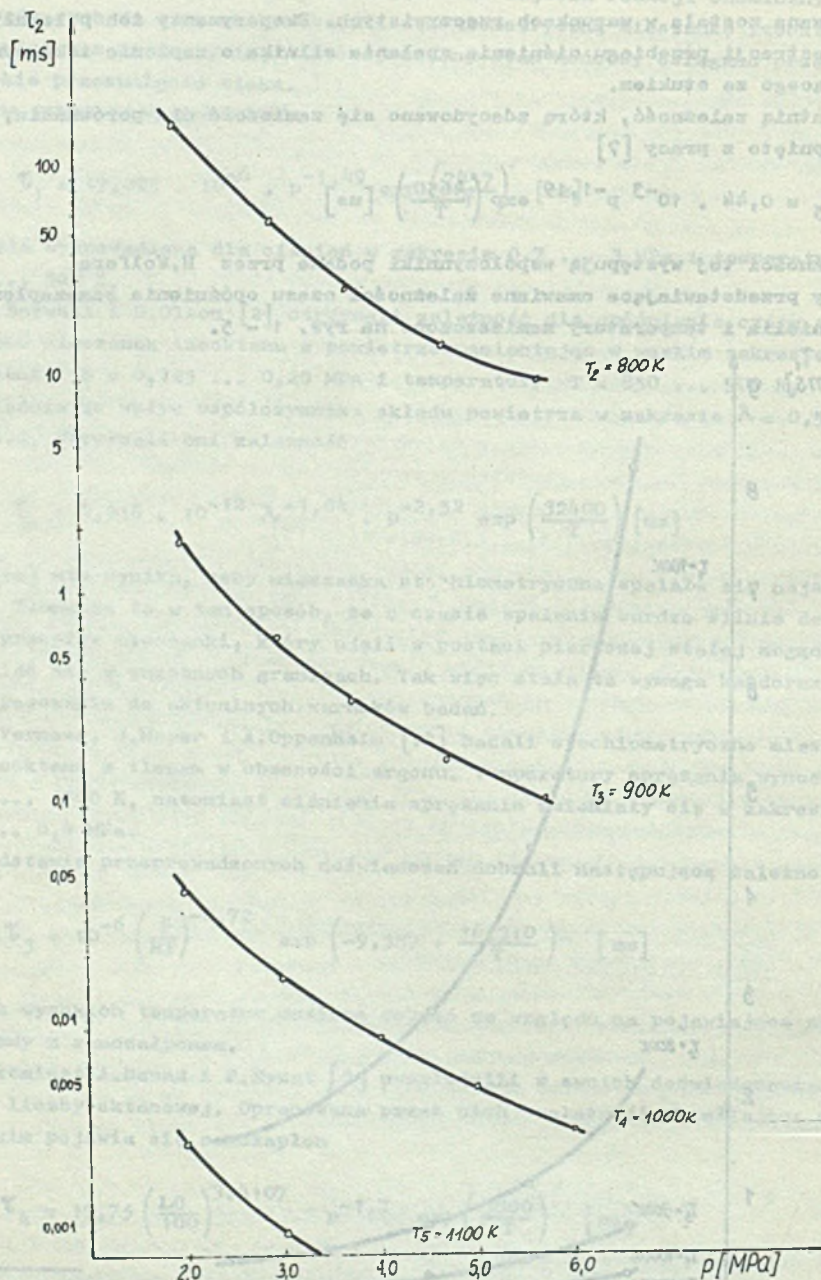
W zależności tej występują współczynniki podane przez H. Wolfera.

Wykresy przedstawiające omawiane zależności czasu opóźnienia samozapłonu od ciśnienia i temperatury zamieszczono na rys. 1 - 5.



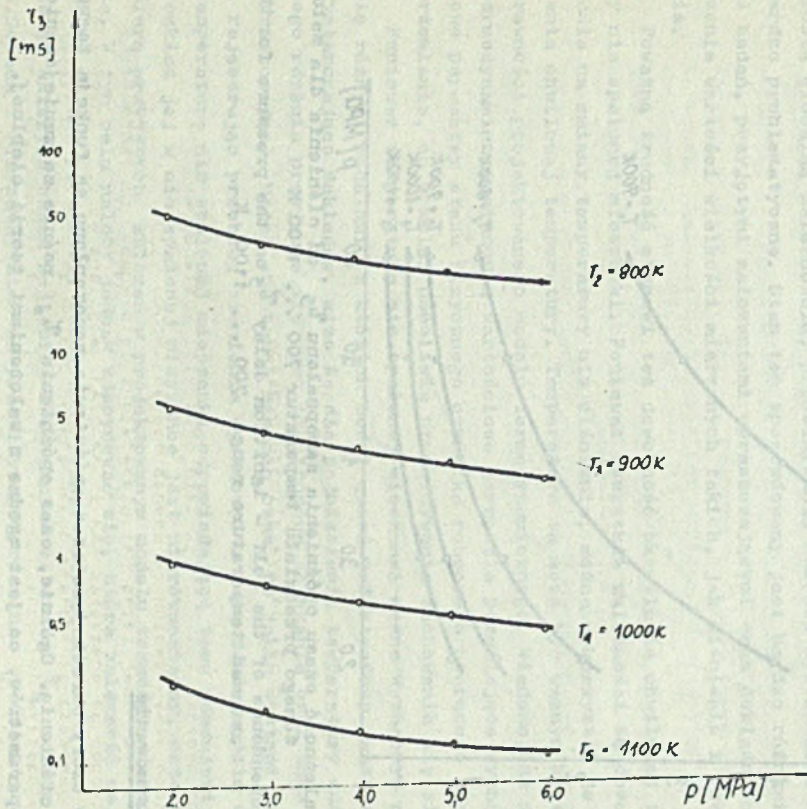
Rys. 1. Zależność czasu opóźnienia samozapłonu τ_1 od ciśnienia dla założonego przedziału temperatur 700 ... 1100 K

Fig. 1. Dependence of the self-ignition delay τ_1 on the pressure for the assumed range of temperatures 700 ... 1100 K



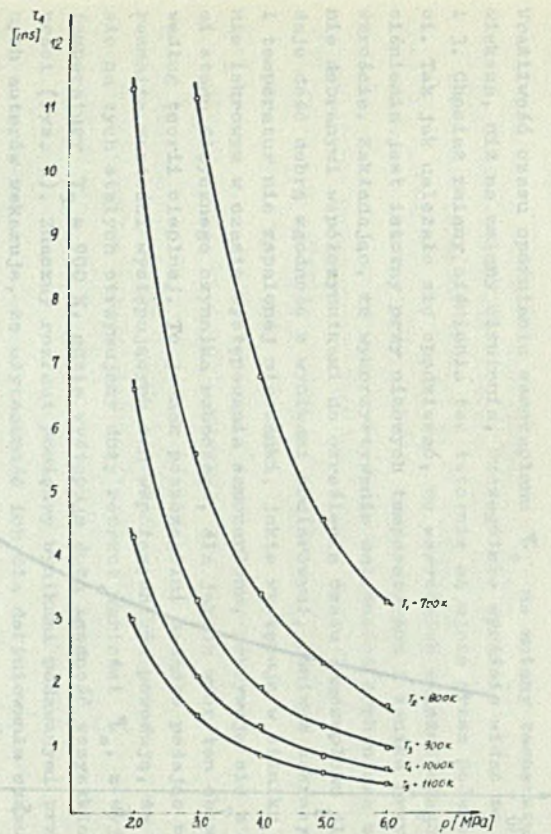
Rys. 2. Zależność czasu opóźnienia samozapłonu τ_2 od ciśnienia dla założonego przedziału temperatur 700 ... 1100 K. Współczynnik składu mieszanek $\lambda = 1$

Fig. 2. Dependence of the self - ignition delay τ_2 on the pressure for the assumed temperature range 700 ... 1100 K. Mixture composition ratio $\lambda = 1$



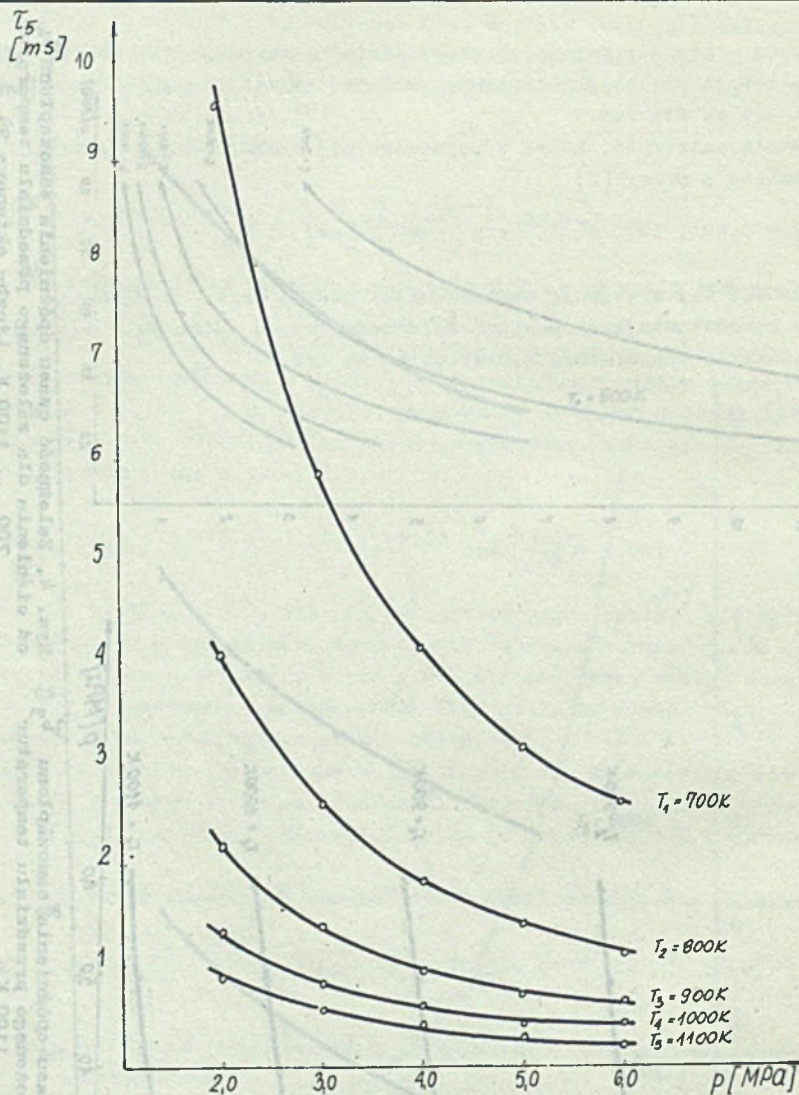
Rys. 3. Zależność czasu opóźnienia samozapłonu τ_3 od ciśnienia dla założonego przedziału temperatur 700 ... 1100 K

Fig. 3. Dependence of the self - ignition delay τ_3 on the pressure for the assumed temperature range 700 ... 1100 K



Rys. 4. Zależność czasu opóźnienia samozapłonu τ_4 od ciśnienia dla założonego przedziału temperatur 700 ... 1100 K, liczba oktanowa 94

Fig. 4. Dependence of the self - ignition delay τ_4 on the pressure for the assumed temperature range 700 ... 1100 K. Octane numbers 94



Rys. 5. Zależność czasu opóźnienia samopłonności τ_5 od ciśnienia dla założonego przedziału temperatur 700 ... 1100 K

Fig. 5. Dependence of the self-ignition delay τ_5 on the pressure for the assumed temperature range 700 ... 1100 K

5. Podsumowanie

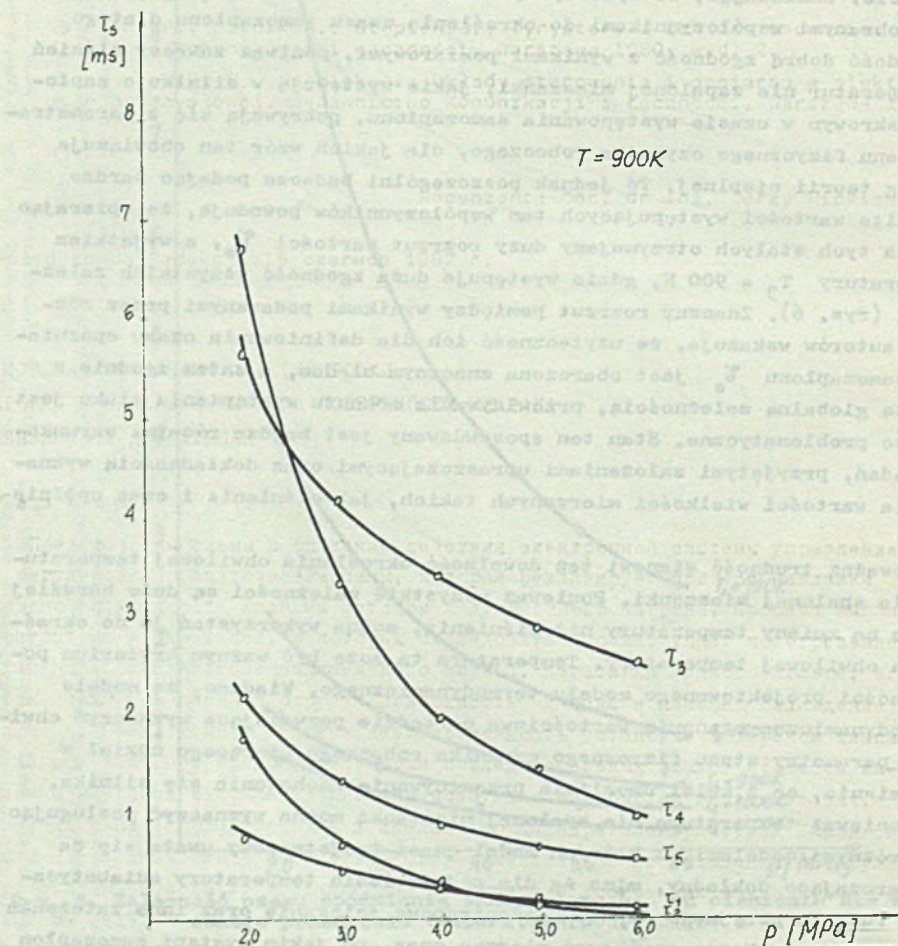
Podane wzory określające czas opóźnienia samopłonności są funkcją temperatury i ciśnienia. Ogólnie, czas opóźnienia τ_s rośnie ze zmniejszaniem się tych parametrów, co jest zgodne z założeniami teorii cieplnej.

Wrażliwość czasu opóźnienia samozapłonu τ_s na zmiany temperatury jest większa, niż na zmiany ciśnienia. Szczególnie wyraźnie widać to na rys. 2 i 3. Chociaż zmiany ciśnienia też istotnie są ujęte przez podane zależności. Tak jak należało się spodziewać, we wszystkich zależnościach wpływ ciśnienia jest istotny przy niższych temperaturach i zanika przy jej wzroście. Zakładając, że wykorzystywanie zależności Arrheniusa z empirycznie dobranymi współczynnikami do określenia czasu samozapłonu dlatego daje dość dobrą zgodność z wynikami pomiarowymi, ponieważ zakresy ciśnień i temperatur nie zapalanej mieszanki, jakie występują w silniku o zapłonie iskrowym w czasie występowania samozapłonu, pokrywają się z parametrami stanu fizycznego czynnika roboczego, dla jakich wzór ten obowiązuje według teorii cieplnej. To jednak poszczególni badacze podając bardzo rozmaite wartości występujących tam współczynników powodują, że opierając się na tych stałych otrzymujemy duży rozrzut wartości τ_s , z wyjątkiem temperatury $T_3 = 900$ K, gdzie występuje duża zgodność wszystkich zależności (rys. 6). Znaczny rozrzut pomiędzy wynikami podawanymi przez różnych autorów wskazuje, że użyteczność ich dla definiowania czasu opóźnienia samozapłonu τ_s jest obciążona znacznym błędem, a zatem zgodnie z prostą globalną zależnością, przewidywanie momentu wystąpienia stuku jest bardzo problematyczne. Stan ten spowodowany jest bardzo różnymi warunkami badań, przyjętymi założeniami upraszczającymi oraz dokładnością wyznaczenia wartości wielkości mierzonych takich, jak ciśnienie i czas opóźnienia.

Powazną trudność stanowi też dowolność określania chwilowej temperatury nie spalanej mieszanki. Ponieważ wszystkie zależności są dużo bardziej czułe na zmiany temperatury niż ciśnienia, można wykorzystać je do określenia chwilowej temperatury. Temperatura ta może być ważnym kryterium poprawności projektowanego modelu termodynamicznego. Wiadomo, że modele termodynamiczne stanowią wartościowe narzędzie pozwalające wyznaczyć chwilowe parametry stanu fizycznego czynnika roboczego biorącego udział w przemianie, co z kolei umożliwia przewidywanie zachowania się silnika.

Ponieważ temperaturę nie spalanej mieszanki można wyznaczyć posługując się różnymi modelami, z których model quasi-trójstrefowy uważa się za wystarczająco dokładny, mimo że dla podniesienia temperatury adiabetycznego rdzenia przyjmuje się jego izotropowe ściskanie oraz inne założenia upraszczające. Można spróbować mierząc czas, po jakim wystąpi samozapłon i rejestrując przebieg ciśnienia wyznaczyć z dużą dokładnością chwilową temperaturę nie spalanej mieszanki odpowiadającą temu momentowi i mimo że rozkład jej w nie spalanej mieszance jest nierównomierny, może być ona miarą przyjętych założeń w projektowanym modelu termodynamicznym silnika. W tym celu należy jednak zdecydować się, która zależność najlepiej wiąże badane parametry. Obserwacje przeprowadzone przez autora wskazują, że do dalszych badań najlepiej uwzględnić zależność τ_s podaną przez A. Douada i P. Byszata, mimo że przewidywane przez nie opóźnienie samozapłonu występuje później niż według innych zależności.

Dobrze widać to na rys. 6, gdzie dla temperatury $T = 900$ K zależność $\tau_{1,3}$ i 5 przewiduje wystąpienie stuku wcześniej niż zależność τ_{4} i 3. Przy innych temperaturach zależności to są jeszcze bardziej widoczne.



Rys. 6. Zależność czasu opóźnienia samozapłonu od ciśnienia obliczanego różnymi zależnościami dla temperatury $T_3 = 900$ K

Fig. 6. Dependence of the self-ignition delay on the pressure calculated by means of various dependences for the temperature $T_3 = 900$ K

LITERATURA

- [1] Jy A., Kempinski B., Rice J.M.: Knock in Spark Ignition Engines SAE Technical Paper Series 810147, February 1981.
- [2] Burwell W.G., Olson D.R.: The Spontaneous Ignition of Isooctane Air Mixtures under Steady Flow Conditions SAE Paper 650520 May 1965.
- [3] Doud A.M., Eyzat P.: Four - Ostone - Number Method for Predicting the Anti - Knock Behaviour of Fuels and Engines SAE Paper 780080 Feb. 1978.
- [4] Draper C.S., Li Y.T.: A New High Performance Engine Indicator of the Strain Gage Type Journal of Aeronautical Science Vol 16, No 10, October 1949.
- [5] Halstead M.P., Tirsch E.J., Quin P.: The Autoignition of Hydrocarbon Fuels at High Temperatures and Pressure - Fitting of a Mathematical Model, Combustion and Flame, Vol 30, 1977.
- [6] Kirsch L.J. Quinn C.P.: A fundamentally Based Model of Knock in the Gasoline Engine, XVIth Symposium International on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh Pennsylvania 1976.
- [7] Kowalawicz A.: Systemy spalania szybkoobrotowych tłokowych silników spalinowych. WIG, Warszawa 1980.
- [8] Maćkowski J.: Wykorzystanie sygnału wibroakustycznego do diagnostyki procesu spalania. Techniczne Zaplecze Motoryzacji 1980, nr 1.
- [9] Maćkowski J.: Próba wykorzystania metod wibroakustycznych do oceny prawidłowości doboru nastawów regulacyjnych silników spalinowych. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., s. Transport, z.3, Gliwice 1986.
- [10] Rifkin E., Walcutt C.: A Basis for Understanding Antiknock Action SAE Transactions vol 65, 1957.
- [11] Rychter T., Teodorczyk A.: Modelowanie matematyczne procesu spalania w silnikach tłokowych. "Auto-Technika-Motoryzacyjna" 1985, nr 3.
- [12] Vermeer D.J., Meyer J.W., Oppenheim A.K.: Auto-Ignition of Hydrocarbons Behind Reflected Shock Waves, Combustion and Flame Vol 18, 1972.
- [13] Zabłocki M.: Wtrysk i spalanie paliwa w silnikach wysokoprężnych. WIG, Warszawa 1976.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Czesław Kordziński

Wpłynęło do Redakcji 30.11.1987 r.

ЭМПИРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПОЯВЛЕНИЯ СТУКОВОГО СГОРАНИЯ

Резюме

Уже на заре развития двигательной промышленности много внимания уделялось проблемам стуквого сгорания в двигателях внутреннего сгорания с искровым зажиганием как фактору ограничивающему прогресс в проектировании. Появление стуквого сгорания в значительной мере ограничивало повышение степени сжатия только до некоторой максимальной величины, что не позволяло на достижение более высоких теоретических кпд. Стуквое сгорание, в связи с образующейся ударной, волной, ведет к вибрациям а мгновенные высокие температуры уменьшают усталостную прочность материала.

Так как причиной возникновения стуквого сгорания может быть самовоспламенение, в работе представлены различные эмпирические зависимости, позволяющие, рассчитать время задержки самовоспламенения стехиометрических смесей. Дан также анализ влияния мгновенных параметров физического состояния рабочего фактора принимающего участие в изменении развития самовоспламенения. Предложено использование известных эмпирических зависимостей для определения мгновенной температуры несгоревшей смеси, что привело к росту точности двух или трехзонной модели с нульразмерностью.

EMPIRICAL METHODS OF DETERMINATION OF THE DETONATION COMBUSTION APPEARANCE TIME

Summary

Significance of the detonation combustion in the engines of spark ignition as a factor limiting the progress in designing has been appreciated just in the beginning of the motor industry development. Appearance of the detonation combustion has limited considerably increasing of the compression ratio to a certain maximum value which was making the obtainment of higher ideal efficiency impossible.

The detonation combustion leads to the vibration due to the shock waves created and high instantaneous temperatures contribute to the material fatigue.

Because of the fact that self-ignition may be the reason of the detonation combustion there have been various empirical dependences given in the work that enable to calculate the self-ignition delay for stoichiometric mixtures.

An influence of the physical state instantaneous parameter of the working agent taking part in the process on the self-ignition propagation have been also analysed and it has been suggested to use considerable empirical dependences for determination of unburnt mixture instantaneous temperature; it would contribute to the accuracy increase of two or three-zone zero-dimensional model.