

**Politechnika Warszawska**

W Y D Z I A Ł M E C H A N I C Z N Y  
E N E R G E T Y K I I L O T N I C T W A



Instytut Techniki Cieplnej

# Praca dyplomowa inżynierska

na kierunku Lotnictwo i kosmonautyka  
w specjalności Napędy lotnicze

Badania procesu przejścia do detonacji na skutek skupienia fali  
uderzeniowej

**Filip Rusiecki**

Numer albumu 299153

**Adam Synowiec**

Numer albumu 289784

promotor  
dr inż. Wojciech Rudy

Warszawa, 2022

## **Streszczenie**

Niniejsza praca dyplomowa inżynierska pod tytułem „Badania procesu przejścia do detonacji na skutek skupienia fali uderzeniowej” ma charakter eksperymentalny. Celem pracy jest lepsze zrozumienie zjawiska spalania w rurze detonacyjnej, szczególnie przejścia z deflagracji do detonacji. W założeniu badania miały na celu skupienie fali uderzeniowej w narożu i pomiar parametrów przepływu, dla których następuje przejście do detonacji. Istotnymi pomiarami, które zostały zmierzone podczas badań są: prędkość fali uderzeniowej w momencie uderzenia w naroże, ciśnienie w narożu oraz opóźnienie zapłonu. Wykonano 50 pojedynczych eksperymentów, w tym 6 testowych w celu kalibracji układu pomiarowego. Badania wykonywane są na specjalnie przygotowanym stanowisku badawczym, którego głównym elementem jest rura detonacyjna, w której dochodzi do zapłonu mieszanki palnej. Za przyspieszanie płomienia odpowiedzialna jest sekcja napędzająca, składająca się z poskładanych warstw siatki. Pomiary zbierane są poprzez czujniki ciśnienia, które rejestrują przebieg fali ciśnieniowej, oraz przez sondy jonizacyjne, które rejestrują propagację płomienia. Przebadano mieszankę wodorowo-powietrzną o stężeniach wodoru: 25%, 29,6% (stechiometryczna), 35% oraz 40%. Zabrane wyniki zostały obrobione w dedykowanym skrypcie napisanym w języku programowania python. Skrypt generował przebiegi czujników ciśnienia oraz sond jonizacyjnych, wykresy dotarcia płomienia oraz fali ciśnieniowej tzw. ToA (ang. time of arrival), wykresy prędkości płomienia oraz fali ciśnieniowej, a także wykresy propagacji fali ciśnieniowej wzdłuż rury. Analiza wyników wykazała 12 detonacji, w tym 7 w narożu (pożądane miejsce). Ustalono, że minimalna prędkość fali ciśnieniowej w narożu do zaistnienia zjawiska DDT (ang. deflagration to detonation transition) wynosi około 800 m/s. Przy detonacji ciśnienia w narożu mieściły się w zakresie powyżej 10 MPa. Dokonano również klasyfikacji występującego w narożu opóźnienia zapłonu w przypadku braku detonacji. IDT (opóźnienie zapłonu, ang. ignition delay time) w zakresie 5-100 us określono jako szybki zapłon, powyżej 100 us jako późny zapłon. W przypadku zjawiska detonacji odnotowano IDT poniżej 2 us. Na podstawie wszystkich wykonanych eksperymentów scharakteryzowano zjawisko przejścia z deflagracji do detonacji jako zjawisko w dużym stopniu nieprzewidywalne i losowe.

Słowa klucze: deflagracja, detonacja, przejście z deflagracji do detonacji, DDT, fala uderzeniowa, fala ciśnieniowa, opóźnienie zapłonu

## **Abstract**

This engineering thesis titled "Research on the deflagration to detonation transition due to shock wave focusing" is an experimental study. The aim of the research is to better understand the phenomenon of combustion in a detonation tube, especially the transition from deflagration to detonation. The aim of the research was to focus the shock wave at the corner and measure the flow parameters for which the transition to detonation occurs. The important measurements that were made during the experiments are the velocity of the shock wave when it hits the corner, the pressure at the corner, and the ignition delay. Fifty individual experiments were performed, including 6 test experiments to calibrate the measurement system. The tests are performed on tailor-made test stand, the main element of which is a detonation tube, in which the ignition of the combustible mixture takes place. The acceleration section, consisting of assembled, thin wire layers, is responsible for accelerating the flame. Measurements are collected by pressure sensors and by ionization probes, which record flame propagation. A hydrogen-air mixture was tested with hydrogen concentrations of 25%, 29.6% (stoichiometric), 35%, and 40%. The results were processed in a dedicated script written in python programming language. The script generated plots of pressure sensors, ionization probes, flame and pressure wave arrival time of arrival (ToA) plots, flame and pressure wave velocity plots, and pressure wave propagation along the pipe. Analysis of the results concluded 12 detonations, 7 of which were in the corner (the desired location for DDT). It was found that the minimum pressure wave velocity at the corner for the DDT phenomenon to occur is about 800 m/s. At the instant of detonation, the pressures in the corner were ranging above 10 MPa. A classification of the ignition delay at the corner was made when there was no instance of detonation at the corner. IDT (ignition delay time) in the range of 5-100 us was determined as fast ignition, above 100 us as late ignition. When IDT was less than 2 us the detonation phenomenon occurred. Based on all experiments performed, the phenomenon of transition from deflagration to detonation was characterized as a largely unpredictable and random.

**Keywords:** deflagration, detonation, deflagration to detonation transition, DDT, shock wave, pressure wave, ignition delay

### Oświadczenie autora (autorów) pracy

Świadomy/-a odpowiedzialności karnej za składanie fałszywych zeznań oświadczam, że niniejsza praca dyplomowa została napisana przeze mnie samodzielnie, pod opieką kierującego pracą dyplomową.

Jednocześnie oświadczam, że:

- niniejsza praca dyplomowa nie narusza praw autorskich w rozumieniu ustawy z dnia 4 lutego 1994 roku o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz.U. z 2006r. Nr 90, poz. 631 z późn. zm.) oraz dóbr osobistych chronionych prawem cywilnym,
- niniejsza praca dyplomowa nie zawiera danych i informacji, które uzyskałem/-am w sposób niedozwolony,
- niniejsza praca dyplomowa nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadawaniem dyplomów lub tytułów zawodowych,
- wszystkie informacje umieszczone w niniejszej pracy, uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami,
- znam regulacje prawne Politechniki Warszawskiej w sprawie zarządzania prawami autorskimi i prawami pokrewnymi, prawami własności przemysłowej oraz zasadami komercjalizacji.

Oświadczam, że treść pracy dyplomowej w wersji drukowanej, treść pracy dyplomowej zawartej na nośniku elektronicznym (płycie kompaktowej) oraz treść pracy dyplomowej w module APD systemu USOS są identyczne.

21.01.2022.....  
data

Synowiec Adam  
Filip Rusiecki  
podpis autora (autorów) pracy

### Oświadczenie

Wyrażam zgodę / ~~nie wyrażam zgody~~<sup>\*1</sup> na udostępnianie osobom zainteresowanym mojej pracy dyplomowej. Praca może być udostępniana w pomieszczeniach biblioteki wydziałowej. Zgoda na udostępnienie pracy dyplomowej nie oznacza wyrażenia zgody na jej kopowanie w całości lub w części.

Brak zgody nie oznacza ograniczenia dostępu do pracy dyplomowej osób:

- reprezentujących władze Politechniki Warszawskiej,
  - członków Komisji Akredytacyjnych,
  - funkcjonariuszy służb państwowych i innych osób uprawnionych, na mocy odpowiednich przepisów prawnych obowiązujących na terenie Rzeczypospolitej Polskiej, do swobodnego dostępu do materiałów chronionych międzynarodowymi przepisami o prawach autorskich.
- Brak zgody nie wyklucza także kontroli tekstu pracy dyplomowej w systemie antyplagiatowym.

21.01.2022.....  
data

Synowiec Adam  
Filip Rusiecki  
podpis autora (autorów) pracy

\*1 - niepotrzebne skreślić

## Spis treści

1.	Wstęp .....	1
2.	Cele i zakres pisania pracy dyplomowej .....	2
3.	Wstęp teoretyczny, przegląd aktualnego stanu wiedzy .....	3
3.1.	Zarys historyczny.....	3
3.2.	Podstawy teoretyczne.....	4
3.3.	Modele przejścia do detonacji.....	9
3.4	Aktualna literatura poświęcona badaniom DDT na skutek skupienia fal uderzeniowych .....	10
4.	Metodyka badawcza i użyte materiały.....	13
4.1.	Opis stanowiska .....	13
4.2.	Procedura badawcza .....	20
5.	Opis wyników i ich analiza .....	21
5.1	Badanie mieszaniny stechiometrycznej o współczynniku ekwiwalencji $\Phi = 1$ .....	23
5.2	Badanie mieszaniny o współczynniku ekwiwalencji $\Phi = 1,6$ .....	54
5.3	Badanie mieszaniny o współczynniku ekwiwalencji $\Phi = 0,8$ .....	89
5.4	Badanie mieszaniny o współczynniku ekwiwalencji $\Phi = 1,28$ .....	108
6.	Wnioski.....	123

## **1. Wstęp**

Mieszanki o charakterze palnym występują na świecie w sposób powszechny jako źródło energii dla różnego rodzaju urządzeń wykorzystujących spalanie. Mają zastosowanie między innymi w przemyśle paliwowym, cieplowniczym, lotniczym czy motoryzacyjnym. Począwszy od domowych kuchenek na butle z gazem, przez złożone instalacje gazowe w samochodach wodorowych, a kończąc na odrzutowych silnikach lotniczych. Obserwuje się ciągle, rosnące zainteresowanie technologiami niskoemisyjnymi dostarczającymi energię np. spalanie wodoru. Wynika to z rosnącej presji organów zarządzających takich jak Unia Europejska, której dyrektywy wprowadzają limity emisji dwutlenku węgla. Użytkowanie mieszank palnych niesie ze sobą szereg niebezpieczeństw, w szczególności narażanie zdrowia i życia ludzi w otoczeniu. Może też spowodować zniszczenia pobliskiego obszaru. Pożary oraz wybuchy spowodowane mieszankami palnymi stanowią bardzo poważne niebezpieczeństwo nie tylko dla specjalistycznych jednostek technologicznych, ale także w życiu codziennym. Zagrożenia i ich przyczyny są często trudne do dostrzeżenia w odpowiednim czasie, a zapobieganie nie zawsze jest łatwe do wykonania. Dla każdej mieszanki palnej istnieje prawdopodobieństwo zapłonu, czy to ze źródła zewnętrznego, czy poprzez samozapłon. Idąc dalej, spalanie mieszanki może przebiegać na różne, niekontrolowane sposoby, a w odpowiednich warunkach możliwe jest przejście do detonacji, której skutki potrafią być katastrofalne dla otoczenia. Przytoczone nieporządne przykłady, które zachodzą przy niekorzystnych warunkach mogą mieć miejsce zarówno w instalacjach gazowych czy podczas spalania mieszanki paliwowo-powietrznej w silniku odrzutowym, co czyni te mechanizmy swoistymi źródłami zagrożenia. Nieprzerwanie od wielu lat prowadzi się badania nad mieszankami palnymi. Analizuje się czynniki wpływające na występowanie nieporządnego zapłonu mieszanki, niekontrolowanego procesu spalania oraz możliwości zaistnienia detonacji. Wyciągnięte wnioski mają przede wszystkim wpływać na poprawę bezpieczeństwa użytkowego mieszank palnych, a także na poprawę efektywności ich zastosowania.

## **2. Cele i zakres pisania pracy dyplomowej**

Podstawowym celem pracy jest przebadanie procesu zapłonu na skutek skupienia się fal uderzeniowych w narożu, ze szczególnym uwzględnieniem procesu przejścia do detonacji. Kolejnym celem jest zestawienie oraz klasyfikacja wykonanych eksperymentów ze względu na rodzaj zapłonu i przejście do detonacji w zależności od prędkości fali uderzeniowej. Decydujące pomiary zachodzą w chwili odbicia fali w narożu kanału detonacyjnego. Niezbędne jest zrozumienie zachodzących zjawisk fizycznych i chemicznych biorących udział w badanym procesie, a następnie określenie kryteriów oraz konkretnych konfiguracji stanowiska potrzebnych do zaistnienia zjawiska detonacji. Podczas badań wykorzystano mieszankę wodorowo-powietrzną o różnych stężeniu wodoru. Otrzymane wyniki eksperymentalne posługują do dalszych analiz oraz porównań z modelami numerycznymi procesu przejścia do detonacji.

### **3. Wstęp teoretyczny, przegląd aktualnego stanu wiedzy**

#### **3.1. Zarys historyczny**

Od połowy drugiego tysiąclecia zaczęto z większą uwagą przyglądać się fizyce spalania i praktycznym jej zastosowaniom, takimi jak materiały wybuchowe czy mieszanki palne. Głównym kierunkiem rozwoju było przeznaczenie przemysłowe i wojenne. Wraz z idącym postępem technologicznym udało się zaobserwować zjawisko gwałtownego spalania oraz wykonać pierwsze pomiary prędkości propagacji frontu spalania. Pozwoliło to odkryć zjawisko detonacji, które zostało po raz pierwszy rozpoznane przez francuskich uczonych Berthelota i Vieille'a oraz Mallarda i Le Chateliera niezależnie od siebie w drugiej połowie XIX wieku. Podczas badań nad rozprzestrzenianiem się płomienia Berthelot i Vieille mierzyli prędkość detonacji w różnych mieszankach paliwowych takich jak mieszaniny wodorowe, etylenowe czy acetylenowe. Na podstawie prowadzonych badań stwierdzono występowanie zjawiska detonacji w lotnych mieszankach wybuchowych. W toku innych badań Mallard i Le Chatelier zauważyli możliwość spalania tej samej mieszaniny w sposób poddźwiękowy - deflagracja oraz naddźwiękowy – detonacja. W latach dziewięćdziesiątych XIX wieku zaczęto szczegółowo opisywać różnice w sposób ilościowy i jakościowy między przytoczonymi kategoriami propagacji spalania.

William Rankine w 1870 roku odkrył, że przejście fali uderzeniowej jest procesem nieadiabatycznym. Dziewiętnaście lat później Pierre-Henri Hugoniot opublikował równanie łączące energię wewnętrzną z energią kinetyczną fali uderzeniowej. Dzięki tym odkryciom w latach późniejszych krzywa opisująca deflagrację i detonację została nazwana krzywą Rankine'a-Hugoniota.

Rachunkowy opis fizyki zjawiska, który określał prędkość detonacji w gazach palnych, został przedstawiony przez Donalda Leonarda Chapmana w 1889 roku i Ehrile Jougueta w latach 1904-05. Naukowcy bazowali na wcześniejszych odkryciach, w tym na równaniach zachowania masy, pędu i energii oraz krzywej Rankine'a-Hugoniota. Minimalna prędkość detonacji mieszanki palnej o zdefiniowanych warunkach początkowych została wyznaczona przez Chapmana oraz Jougueta i przedstawała się ją jako prędkość CJ.

Rosyjski fizyk Yakov Zeldovich (1940-1950) udowodnił, że do zaistnienia fali uderzeniowej potrzeba więcej czynników niż wyłącznie wzrost entropii. Konieczny jest bodziec inicjujący falę uderzeniową. Geoffrey Ingram Taylor w połowie XX wieku zaznaczył istotę warunków brzegowych czoła fali uderzeniowej, aby wyniki eksperymentów i opisy teoretyczne były spójne.



Rysunek 1 Kolejno od lewej: Marcellin Berthelot [20], Jacques Jougues [17], David Chapman [18]

W teorii Chapman-Jougueta nie jest uwzględniane przekształcenie reagentów w produkty biorących udział w reakcji spalania. Przez to teoria CJ była niekompletna i nie pozwalała w pełni wyjaśnić fizyki zjawiska rozchodzenia się fali detonacyjnej. Braki uzupełnili Yakov Zeldovich, John von Neumann oraz Werner Döring w latach czterdziestych XX wieku. Model matematyczny został opisany przez Zeldovicha, procesy związane z kryterium CJ były badane przez Von Neumanna, natomiast Döring podejmował temat występowania detonacji w gazach. W uznaniu za zasługi badawcze model rozbudowany względem modelu CJ, opisujący detonację i rozchodzenie się fali, został nazwany jako model ZND (Zeldovicha-von Neumann-Döringa).



Rysunek 2 kolejno od lewej: Yakov Zeldovich [19], John von Neumann [21]

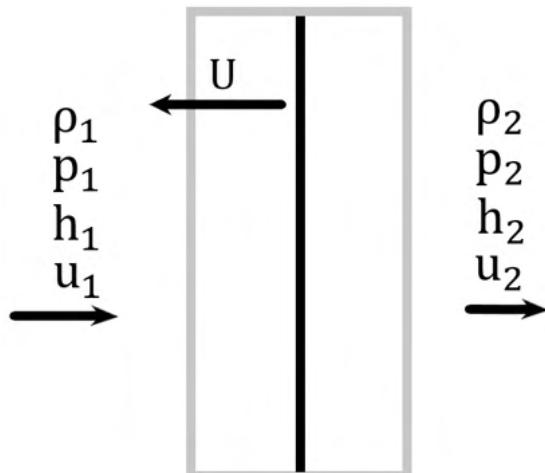
### 3.2. Podstawy teoretyczne

W jednowymiarowym przepływie ustalonym z prostopadłą falą uderzeniową, gdzie oznaczenia  $\rho_1, u_1, p_1, h_1$  są to odpowiednio: gęstość, prędkość przepływu, ciśnienie statyczne, entalpia przed falą uderzeniową. Natomiast  $\rho_2, u_2, p_2, h_2$  są wartościami za poruszającą się falą uderzeniową z prędkością  $U$ . Równania zachowania masy [3.2.1], pędu [3.2.2] i energii [3.2.3] dla takiego przepływu wyrażają się:

$$\rho_1(u_1 - U) = \rho_2(u_2 - U) \quad (3.2.1)$$

$$p_1 + \rho_1 u_1 (u_1 - U) = p_2 + \rho_2 u_2 (u_2 - U) \quad (3.2.2)$$

$$h_1 + \frac{(u_1 - U)^2}{2} = h_2 + \frac{(u_2 - U)^2}{2} \quad (3.2.3)$$



Rysunek 3 jednowymiarowy przepływ ustalony z prostopadłą falą uderzeniową

Przy założeniach równania stanu gazu doskonałego, kaloryczne równanie stanu entalpii wyraża się jako:

$$h = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p}{\rho}, \text{ gdzie } k = \frac{c_p}{c_v} \quad (3.2.4)$$

Mając cztery równania dla pięciu szukanych zmiennych: gęstość, ciśnienie statyczne, prędkość, entalpię za falą oraz prędkość przed falą potrzebna jest piąta zależność.

W celu uzupełnienia brakującego równania Chapman i Jouguet przedstawili kryterium, które umożliwia wyjaśnienie i opisanie procesu przyspieszania płomienia. Korzystając z linii Rayleigha – Michelsona oraz krzywych Rankine'a-Hugoniota można wyznaczyć wtedy wszystkie szukane parametry.

Przy założeniach gazu doskonałego, kombinacja równań zachowania masy (3.2.1) i pędu (3.2.2) pozwala na uzyskanie wyrażenia:

$$p_2 = p_1 + \dot{m}^2 \left( \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right) \quad (3.2.5)$$

Interpretacje graficzne powyższego wyrażenia nazwane są liniami Rayleigha – Michelsona.

Kolejne przekształcenia wyrażenia (3.2.5) pozwalają otrzymać postać:

$$\frac{p_2 - p_1}{\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2}} = \dot{m}^2 > 0,$$

$$\text{gdzie objętość właściwa: } v = \frac{1}{\rho} \quad (3.2.6)$$

Wyrażenie na wydatek masy przepływu wyraża się:

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{p_2 - p_1}{\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2}}} \quad (3.2.7)$$

Biorąc pod uwagę, że wyrażenie na wydatek masy jest pod pierwiastkiem, iloraz różnic ciśnień oraz różnic odwrotności gęstości musi być tego samego znaku. Z tego wynika, że po przejściu frontu płomienia ciśnienie i gęstość jednocześnie maleją bądź jednocześnie rosną:

$$p_2 < p_1 \text{ i } \rho_2 < \rho_1 - \text{spalanie deflagracyjne}$$

$$p_2 > p_1 \text{ i } \rho_2 > \rho_1 - \text{spalanie detonacyjne}$$

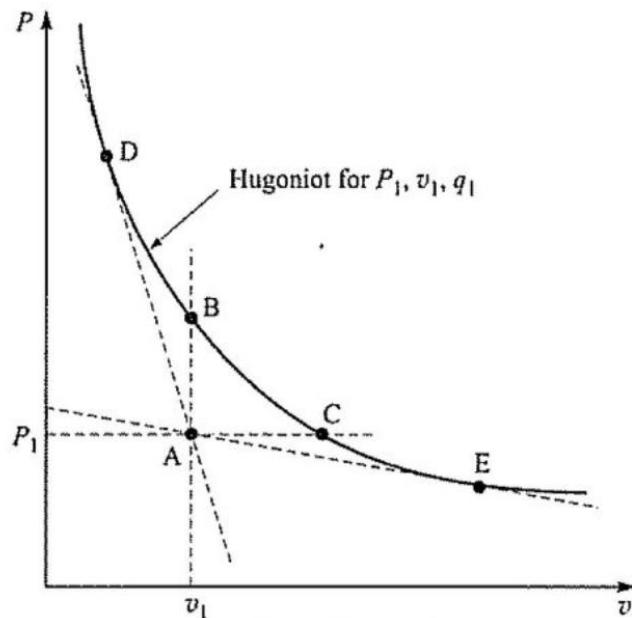
Deflagracja jest podźwiękowym spalaniem mieszaniny kontrolowanym przez procesy dyfuzji ciepła i masy. Detonacja to spalanie naddźwiękowe, które poprzedzone jest falą uderzeniową. Zjawisko detonacji można rozpatrywać jako złożony proces najpierw sprężania mieszanki przy pomocy fali uderzeniowej, a następnie chemicznego procesu spalania. Oba te zjawiska są od siebie niezależnie, jednak intensywnie na siebie oddziałują.

Dodając do rozważań równanie zachowania energii (3.2.3) i przekształceniu tego równania wraz z wyrażeniami zachowania masy (3.2.1) i pędu (3.2.2) otrzymać można:

$$p_2 \left( \frac{1}{\rho_2} \frac{k+1}{k-1} - \frac{1}{\rho_1} \right) - p_1 \left( \frac{1}{\rho_1} \frac{k+1}{k-1} - \frac{1}{\rho_2} \right) - 2Q = 0 \quad (3.2.8)$$

gdzie Q to doprowadzone ciepło

Interpretacja graficzna powyższego wyrażenia nazwana jest krzywą Rankine'a-Hugoniota.



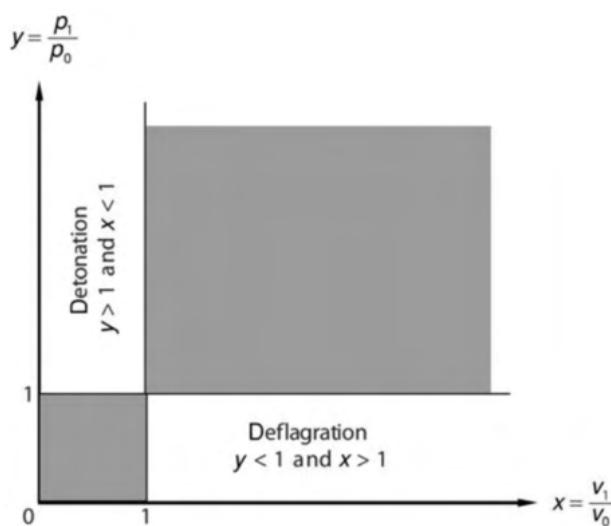
Rysunek 4 wykres przedstawiający krzywą Rankine'a-Hugoniota (linia ciągła) oraz linie Rayleigha – Michelsona (linia przerywana styczna do ciągłej) [15]

Na przedstawionym rysunku 2 można wyróżnić charakterystyczne zakresy:

- silna detonacja – powyżej punktu D, rzadko obserwowana (jedynie w specjalistycznych warunkach)
- słaba detonacja – między punktami D i B
- słaba deflagracja - między punktami C i E
- silna deflagracja – poniżej punktu E, nieobserwowna ze względu na zbyt duży spadek ciśnienia
- brak rozwiązań fizycznych – między punktami B i C

Punkt D nazywany jest detonacją CJ, a punkt E deflagracją CJ.

Zdefiniowanie rzeczywistych przestrzeni rozwiązań, w których wyrażenie  $\frac{p_2-p_1}{v_1-v_2} > 0$  pozwala otrzymać poniższy wykres.



Rysunek 5 Zakres rozwiązań deflagracji i detonacji [1]

Z poniższego równania (3.2.9) wynika, że spaliny detonacji podążają w tym samym kierunku co fala detonacyjna, natomiast przy deflagracji w stronę przeciwną niż płomień.

$$\frac{p_2 - p_1}{u_1 - u_2} = \rho_1(u_1 - U) \quad (3.2.9)$$

Dla punktów CJ na rysunku 4 można wykazać zależności:

$$U_D = \frac{\rho_2}{\rho_1} a_2 > a_1 \quad (3.2.10)$$

Z równania 3.2.10 można wynioskować, że fala detonacyjna propaguje z prędkością naddźwiękową względem ośrodka.

$$U_D^2 = \frac{a_1^2}{k+1} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (3.2.11)$$

Natomiast z równania 3.2.11 można wysnuć wniosek, że prędkość fali deflagracyjnej jest mniejsza niż prędkość dźwięku ośrodka ( $k < 1$ ,  $\rho_2 < \rho_1$ ).

Przy odpowiednich założeniach ( $Q \gg c_{p1}T_1$ ) i przekształceniach prędkość detonacji CJ można przedstawić jako:

$$U_D = \sqrt{2Q \cdot (k_1^2 - 1)} \quad (3.2.12)$$

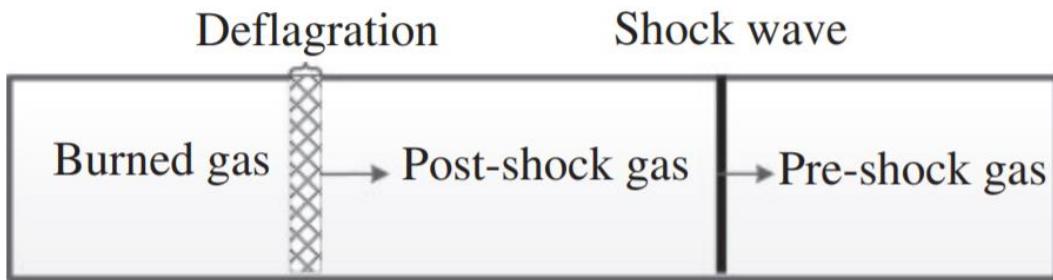
Wynika z tego, że prędkość detonacji CJ jest stałą fizyczną.

Przykładowe prędkości detonacji CJ przedstawia poniższa tabela.

Tabela 1 przykładowe wartości prędkości detonacji CJ wyliczone w programie Gaseq

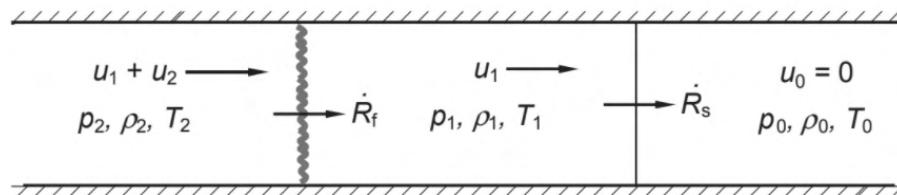
Warunki początkowe: $p_0 = 1 \text{ bar}$ , $T_0 = 298 \text{ K}$	
Mieszanina	Prędkość detonacji $V_{CJ} [\text{m/s}]$
Metan-powietrze (9,5% metanu)	1804,77
Wodór-powietrze (29,6% wodoru)	1979,24
Propan-powietrze (4,0% propanu)	1801,67
Izooctan-powietrze (1,7% izooctanu)	1797,27

Dolna część krzywej Rankine'a-Hugoniota rozpatrująca spalanie deflagracyjne jest omówiona w literaturze naukowej w mniejszym stopniu niż zakres detonacyjny. Wynika to z przesłanek praktycznych, które głównie skupiają się na detonacji ze względu na jej dynamiczny charakter. Nie obserwuje się stałej prędkości propagacji spalania deflagracyjnego, natomiast prędkość detonacji jest stała dla konkretnej mieszanki palnej i odpowiadającym jej warunkom początkowym. Wartość tą można wyznaczyć analitycznie (wzór 3.2.12) oraz potwierdzić eksperymentalnie. Przepływy przed oraz za falą uderzeniową są poddźwiękowe w przypadku słabych deflagracji. Istotny wpływ na prędkość deflagracji mają warunki początkowe zjawiska np. ciśnienie czy temperatura mieszaniny. Nie sposób przeprowadzić powtarzalnych eksperymentów spalania deflagracyjnego. Wynika to z niestabilności procesu spalania. Front płomienia ma skłonności do samoczynnego przyspieszania spowodowanego turbulizacją płomienia. Fale ciśnieniowe, które powstają wskutek skokowego wydzielania ciepła we froncie reakcji, destabilizują płomień. Jest to jeden z mechanizmów powodujących dodatnie sprzężenie zwrotne, które wzmacnia niestabilność zjawiska i przyspiesza deflagrację.



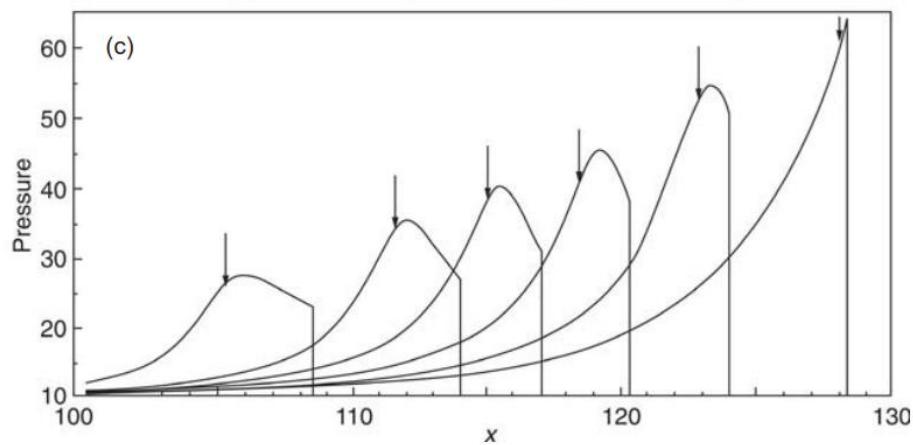
Rysunek 6 Deflagracja rozprzestrzeniająca się w zamkniętej rurze [16]

Punkt E (rys. 4) wskazuje najwyższą prędkość deflagracji, którą można otrzymać. Ze względu na zakres braku rozwiązań na krzywej Rankine'a-Hugoniota przejście z deflagracji do detonacji w sposób ciągły i stabilny jest niemożliwe, jest to skokowe i dynamiczne przejście między dwoma stanami fizycznymi. Jest to tzw. proces DDT.



Rysunek 7 Rozprzestrzeniający się płomień po fali uderzeniowej w gładkiej rurze [1]

Yakov Zeldovich postulował istnienie mechanizmu odpowiadającego za powstanie detonacji poprzez gradientowe wzmacnianie fali uderzeniowej. Obecnie taki mechanizm przedstawiany jest jako mechanizm SWACER (ang. shock wave amplification by coherent energy release). W SWACER obserwuje się wzmacnianie fali uderzeniowej poprzez uwalnianie energii chemicznej w odpowiednim momencie. Rejestruje się także skokowy wzrost ciśnienia za falą uderzeniową. Mechanizm ten uwzględnia zaburzenia gazu, podczas których zachodzi dynamiczne oddziaływanie na siebie cząsteczek i wydzielanie energii chemicznej, co powoduje zwiększenie poziomu niestabilności zjawiska. W chwili, gdy wzmacniające się fale ciśnieniowe doganiają pierwotną falę uderzeniową, dochodzi do detonacji według teorii Champana-Jougueta.



Rysunek 8 wzmacnianie ciśnień powodujące detonację w obszarze energii krytycznej przy użyciu mechanizmu SWACER (strzałka wskazuje lokalizację strefy reakcji) [1]

### 3.3. Modele przejścia do detonacji

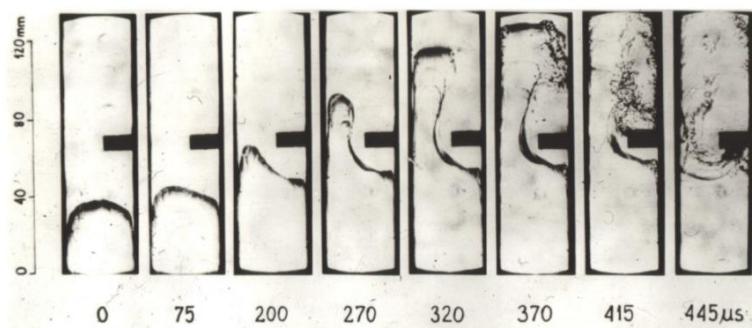
Na bazie eksperymentów wykonywanych od dziesiątek lat udało się określić mechanizmy przejścia do detonacji [6].

Bezpośrednie przejście:

- Bezpośrednia inicjacja detonacji na skutek krytycznej energii zapłonu [7]

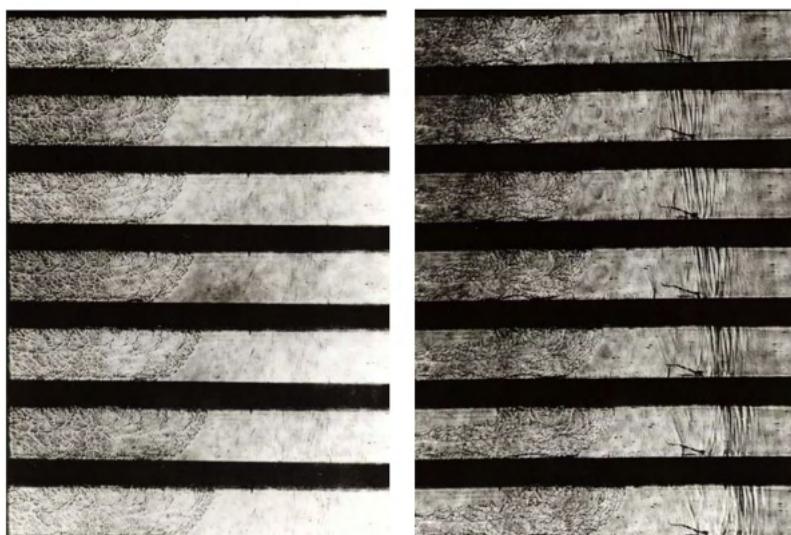
Pośrednie przejście na skutek DDT:

- Inicjacja detonacji spowodowana ogniskowaniem fal uderzeniowych (ang. shock focusing) [8]
- Przejście z deflagracji do detonacji za spowodowane gradientem temperatury w warstwie przyściennej lub pomiędzy płomieniem, a wiodącą falą uderzeniową [9]
- DDT, który jest spowodowany wstępnią kompresją na końcu kanału przez powolny płomień [10]
- DDT w szorstkich lub wypełnionych przeszkodami rurach [11]
- Inicjacja strumienia spowodowana temperaturą oraz koncentracją gradientów w strukturze płomienia [12]
- DDT w układach wielofazowych wynikające z relaksacji temperatury wywołanej przez cząstki [13]



Rysunek 9 Propagacja płomienia przez przeszkodę; początek detonacji [1]

Na rysunku 9 można zaobserwować zjawisko pośredniego przejścia na skutek DDT w rurze z przeszkodami.

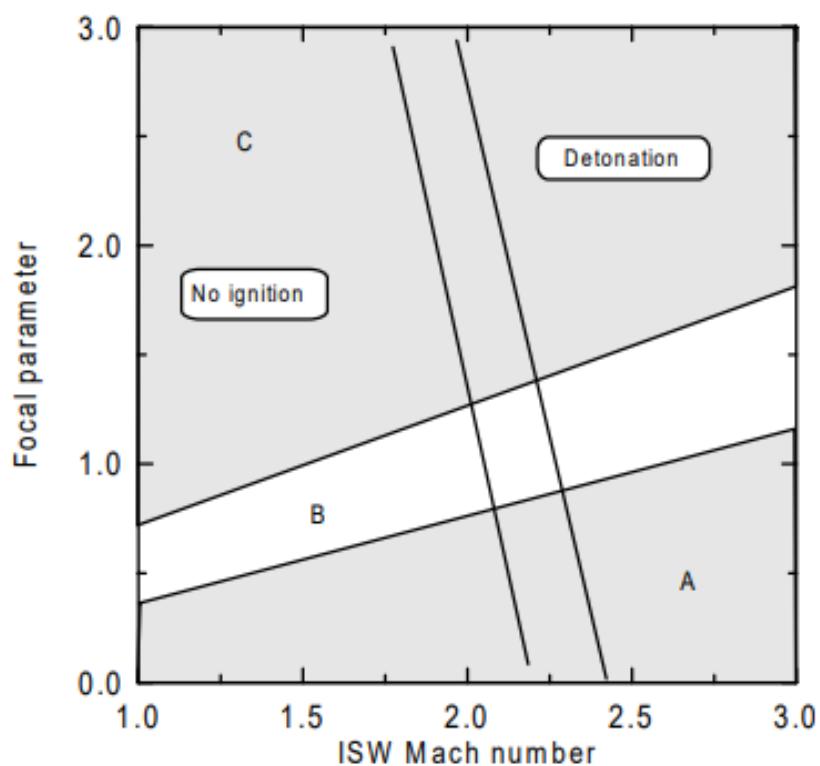


Rysunek 10 Kolejno od lewej: Początkowa faza przyspieszania płomienia po zapłonie, późniejsze etapy przyspieszania płomienia. [1]

### 3.4 Aktualna literatura poświęcona badaniom DDT na skutek skupienia fal uderzeniowych

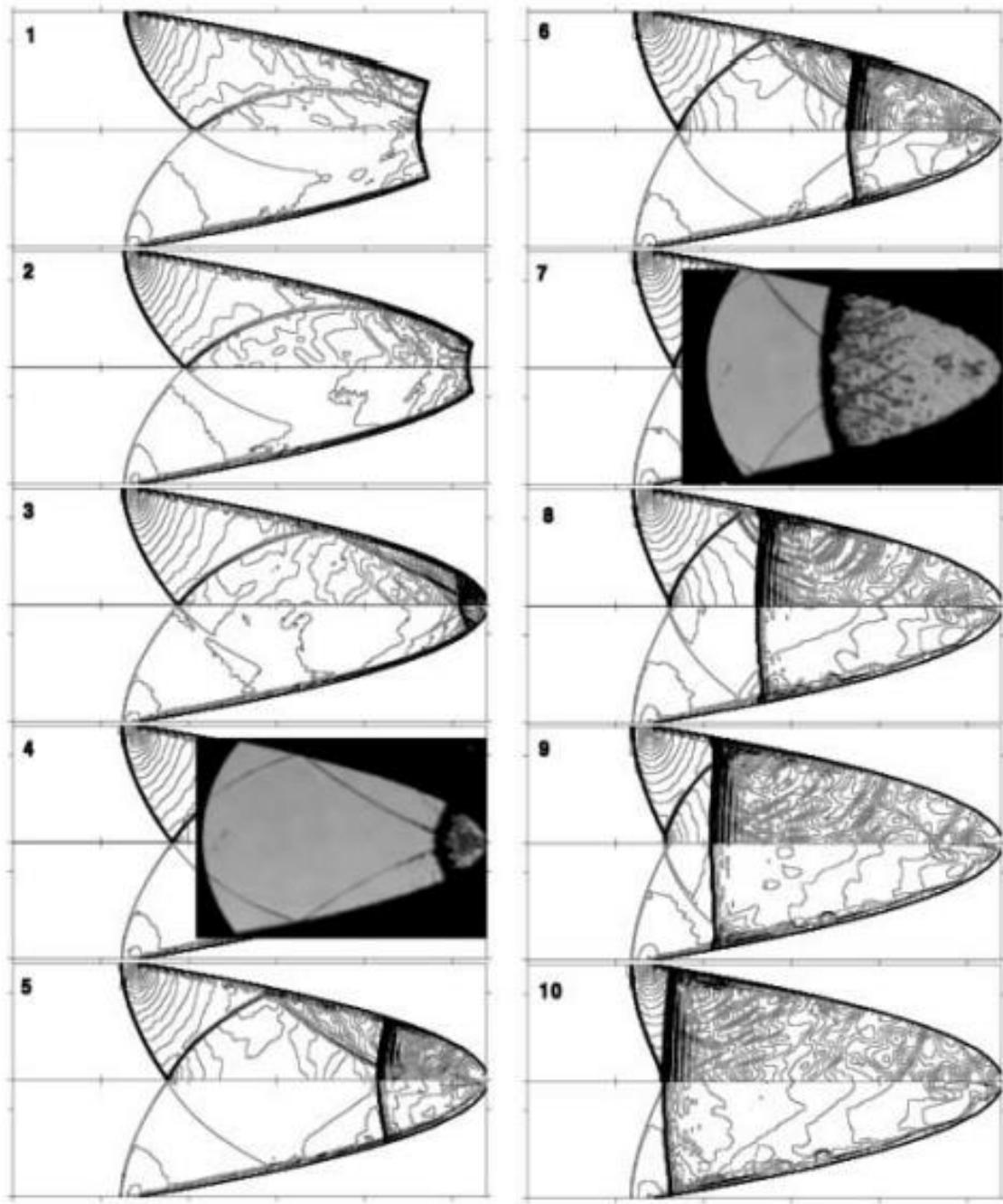
Badania poświęcone procesowi przejścia do detonacji trwają nieprzerwanie od wielu lat, są przedmiotem zainteresowania z praktycznego i teoretycznego punktu widzenia. Dużo na ten temat zostało już przedstawione, wykonano liczne eksperymenty na całym świecie, analizy numeryczne oraz opisy zjawiska DDT. Po wykonanych badaniach pojawiają się prace naukowe, które podsumowują bieżący stan wiedzy.

Jednym z popularnych rodzajów badania procesu DDT jest badanie za pomocą reflektorów parabolicznych, których zadaniem jest skupienie fali uderzeniowej. Głównym obiektem badań jest prędkość fali uderzeniowej padającej na reflektor wyrażonej w liczbie Macha tuż przed detonacją (ang. incident shock wave Mach number). Jednym z przykładów takich prac jest artykuł [4], Zawarto w nim stwierdzenie, że odbicie fali uderzeniowej determinowane jest przez geometrię aparatu skupiającego falę oraz prędkości padania fali uderzeniowej.



Rysunek 11 Diagram zależności geometrii reflektora w funkcji padania fali uderzeniowej [4]

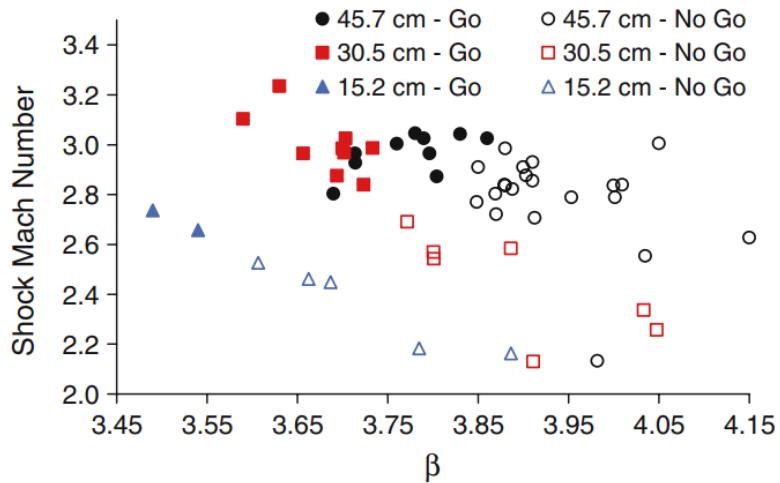
Zgodnie z rysunkiem 11 przewidywana liczba Macha fali uderzeniowej przed detonacją mieści się w zakresie od około 2 – 3 Macha (747 – 1121 m/s) dla mieszanki wodorowo-powietrznej o stężeniu wodoru 15%. Zakres prędkości zależy od konkretnej konfiguracji reflektora (ang. focal parameter – parametr ogniskowy, im większy, tym bardziej rozwarta parabola). Dla geometrii reflektora z większym parametrem ogniskowym, wymagana jest mniejsza minimalna prędkość fali uderzeniowej do zaistnienia zjawiska detonacji.



Rysunek 12 inicjacja detonacji w reflektorze parabolicznym [4]

Rysunek 12 przedstawia proces przejścia do detonacji w reflektorze parabolicznym.

Badania nad przejściem z deflagracji do detonacji nie ograniczają się do mieszaniny wodorowo-powietrznej. Innym przykładem badanej mieszaniny jest stechiometryczna mieszanina etylenowo-tlenowa z dodatkiem azotu. W pracy naukowej [5] sprawdzano wpływ odbicia fali uderzeniowej od płytki zwężającej przepływ na zaistnienie procesu DDT. Zmieniano stężenie azotu w mieszaninie oraz konfigurowano długość sekcji badawczej.



Rysunek 13 wykres liczby Macha fali uderzeniowej dla różnych konfiguracji sekcji badawczej w funkcji  $\beta$  [5]

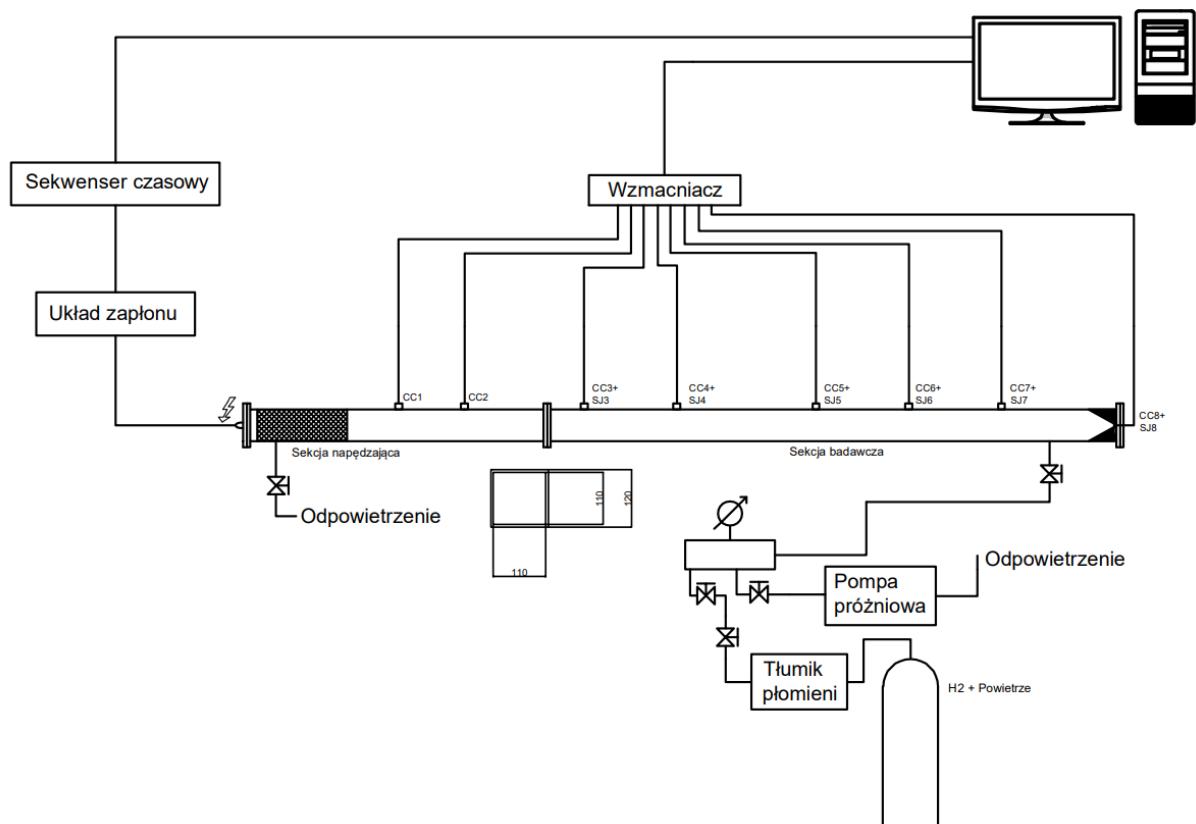
Na rysunku 13 zamieszczone zostały wyniki przeprowadzonych w badaniu eksperymentów. Zarejestrowane detonacje (wypełnione punkty) mieścią się w zakresie około 2,6-3,2 Macha (897-1104 m/s) fali uderzeniowej przed odbiciem. Przedstawiony wykres jest w funkcji stężenia azotu w mieszaninie ( $\beta$  określona jako stosunek molowy azotu do tlenu). Można zaobserwować wyraźny wpływ zmiany konfiguracji sekcji badawczej na występowanie zjawiska przejścia do detonacji oraz na prędkość fali uderzeniowej. Dla konkretnych konfiguracji można wyróżnić wartość krytyczną  $\beta$  (wartość, powyżej której nie dochodzi do detonacji).

## **4. Metodyka badawcza i użyte materiały**

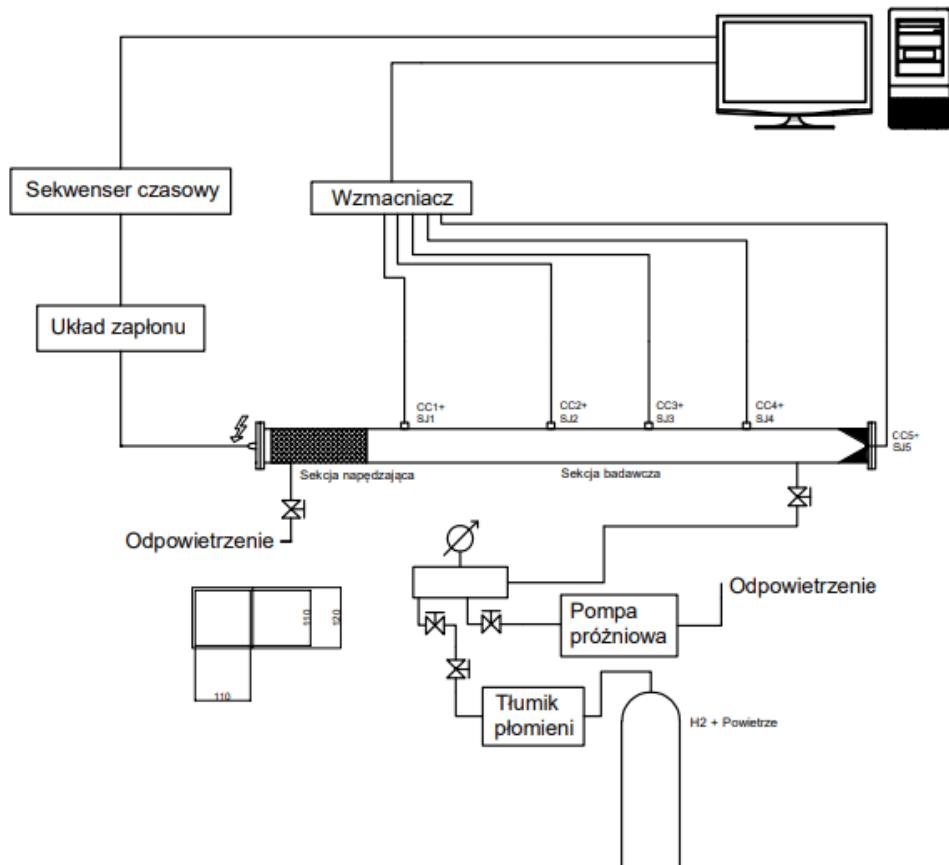
### **4.1. Opis stanowiska**

Głównym elementem stanowiska badawczego wykorzystywanego do pomiarów jest rura stalowa wykonana ze stali kwasoodpornej składająca się z dwóch odcinków: pierwszego jednometrowego oraz drugiego dwumetrowego (konfiguracja 1 – złączone obydwa odcinki). Wymiary zewnętrzne rury: 0,12x0,12x3,0m. Rura dzieli się na sekcję napędzającą oraz sekcję badawczą, w której zbierane są pomiary. Głównym elementem sekcji napędzającej są siatki nałożone na cztery pręty gwintowane 6x6mm i grubości 1mm, długość sekcji około 35cm. Sekcja napędzająca może występować w różnych konfiguracjach dla wykonywanych eksperymentów, odpowiedni układ sekcji turbulizuje płomień, przez co propaguje on z większą prędkością. Jeden człon sekcji napędzającej składa się z dziesięciu poskładanych warstw siatki. Dodatkowo do członu można dodawać pojedyncze warstwy bądź odejmować w zależności od wymaganej na dany eksperiment konfiguracji. Układ pomiarowy odpowiedzialny jest za zbieranie i zapisywanie wyników z czujników ciśnienia i sond jonizacyjnych. Składa się on z komputera i kart pomiarowych. Istotnym elementem stanowiska jest wzmacniacz, który zwiększa amplitudę sygnałów. Do pomiaru ciśnienia wykorzystywane są czujniki piezokwarcowe (na ściskanym piezokwarcu występuje zjawisko piezoelektryczne, przyłożona siła do kryształu kwarcu powoduje wytworzenie napięcia na jego końcach) używane do rejestrowania fali ciśnieniowej. Czujnik mierzy ładunek wytworzony na krysztale piezokwarcu. Oprócz tego do wykonywania pomiarów wykorzystywana jest sonda jonizacyjna (są to dwa druty umieszczone w przepływie), propagujący płomień zwiera obwód, a prąd, który przepływa przez sondę możemy zmierzyć poprzez pomiar spadku napięcia na oporniku. Jest to sposób rejestracji czasu dotarcia płomienia do czujnika. W konfiguracji 1 występuje 8 czujników ciśnienia oraz 5 sond. Do akwizycji danych potrzebny jest sekvenser czasowy. Jest to urządzenie regulujące kolejność i czas wyzwalania układu zapłonowego oraz zestawu kart pomiarowych. Opóźnienie reakcji zapisu kart pomiarowych względem inicjacji iskry określono jako wartość  $t_3 = 40$  ms. Do rury podłączone są przyłącza gazowe, butle z gazem, a także system zaworów, który służy do opróżniania rury przed napełnieniem jej mieszaniną palną. Świeca zapłonowa odpowiedzialna jest za przeskok iskry i zapalenie mieszanki. Do butli zamontowany został tłumik płomieni, tj. urządzenie wygaszające płomień w przypadku, gdy taki pojawiłby się w mieszaninie palnej. Kolejnym elementem stanowiska jest manometr, który odpowiada za pomiar ciśnienia statycznego. Podłączona jest również pompa próżniowa, która pozwala opróżnić kanał. Rura umożliwia badania mieszaniny o ciśnieniu początkowym do 1 bara. Próbkowanie wykonywane jest w zakresie 1-2MHz. Po przeprowadzeniu części badań zdecydowano się zmodyfikować stanowisko badawcze skracając je o odcinek jednometrowy oraz zostawiając 5 par czujnik-sonda (konfiguracja 2). Wynikało to chęci przyspieszenia wykonywanych badań. Zmniejszenie objętości rury detonacyjnej pozwoliło na wykonanie większej liczby pojedynczych eksperymentów przy tej samej ilości gazu w butli. Mieszanka przygotowana była na podstawie prawa Daltona (prawo ciśnień cząstkowych) w butli o pojemności 8 litrów, napełniana była do 10 barów. Następnie po odpowiednim czasie potrzebnym na wymieszanie, mieszanka wpuszczana była do rury detonacyjnej.

Schematy stanowiska badawczego:

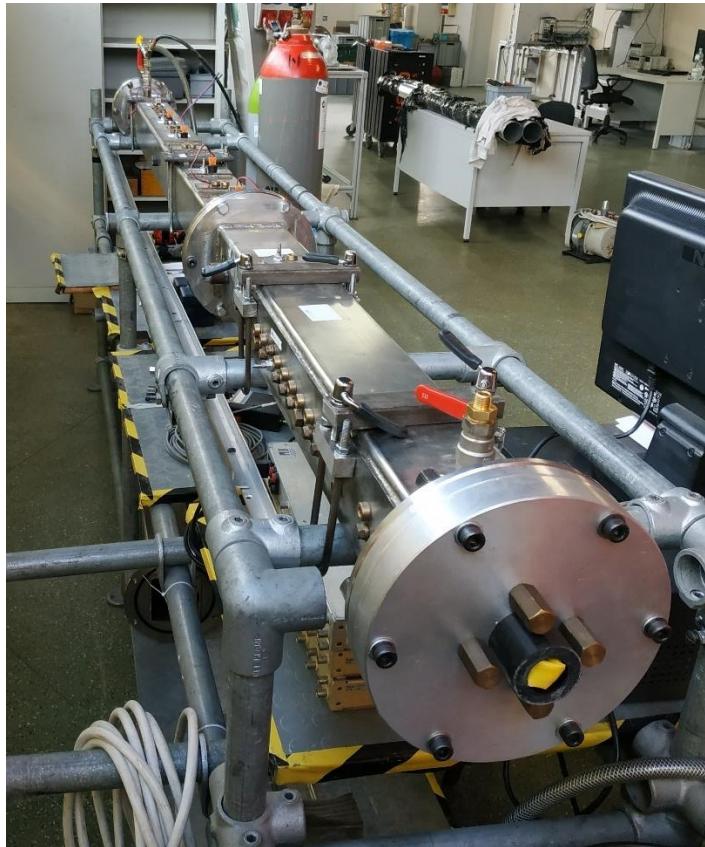


Rysunek 14 schemat stanowiska badawczego konfiguracja 1

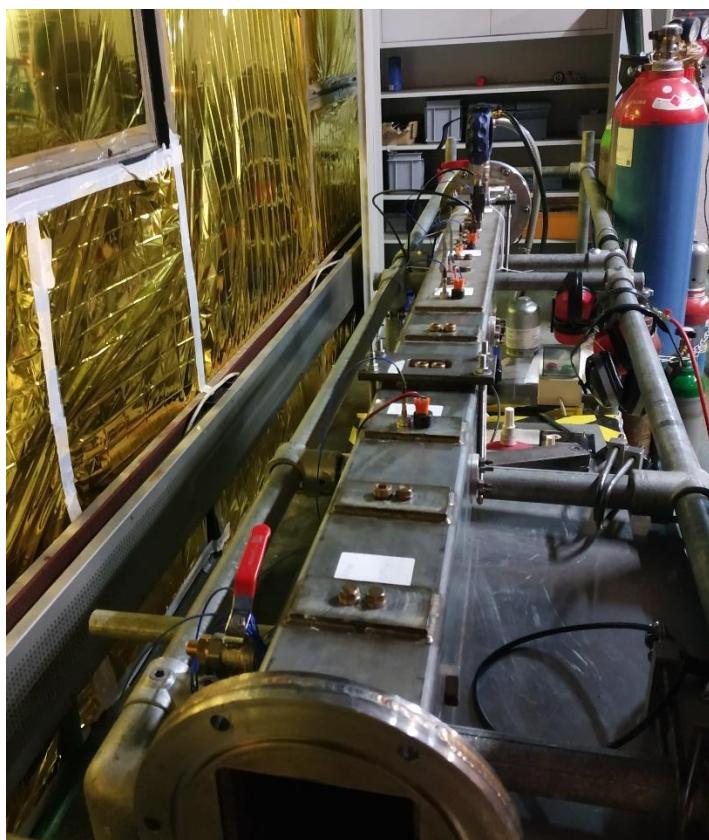


Rysunek 15 schemat stanowiska badawczego konfiguracja 2

Poniżej przedstawiono zdjęcia wybranych detali stanowiska badawczego.



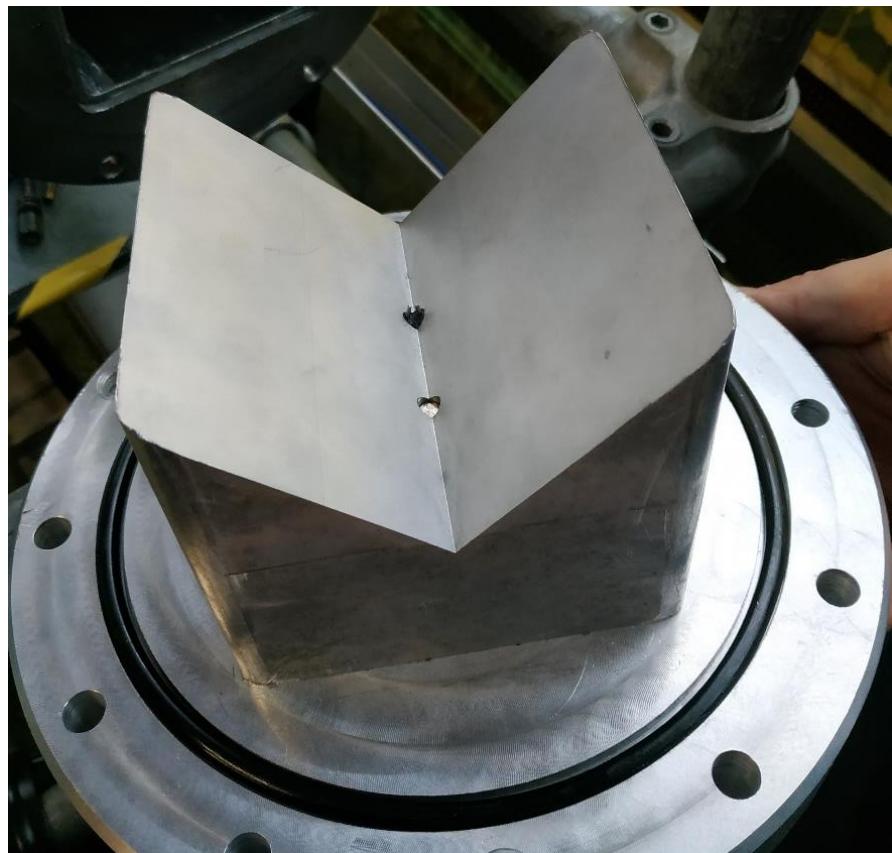
Rysunek 16 stanowisko badawcze konfiguracja 1



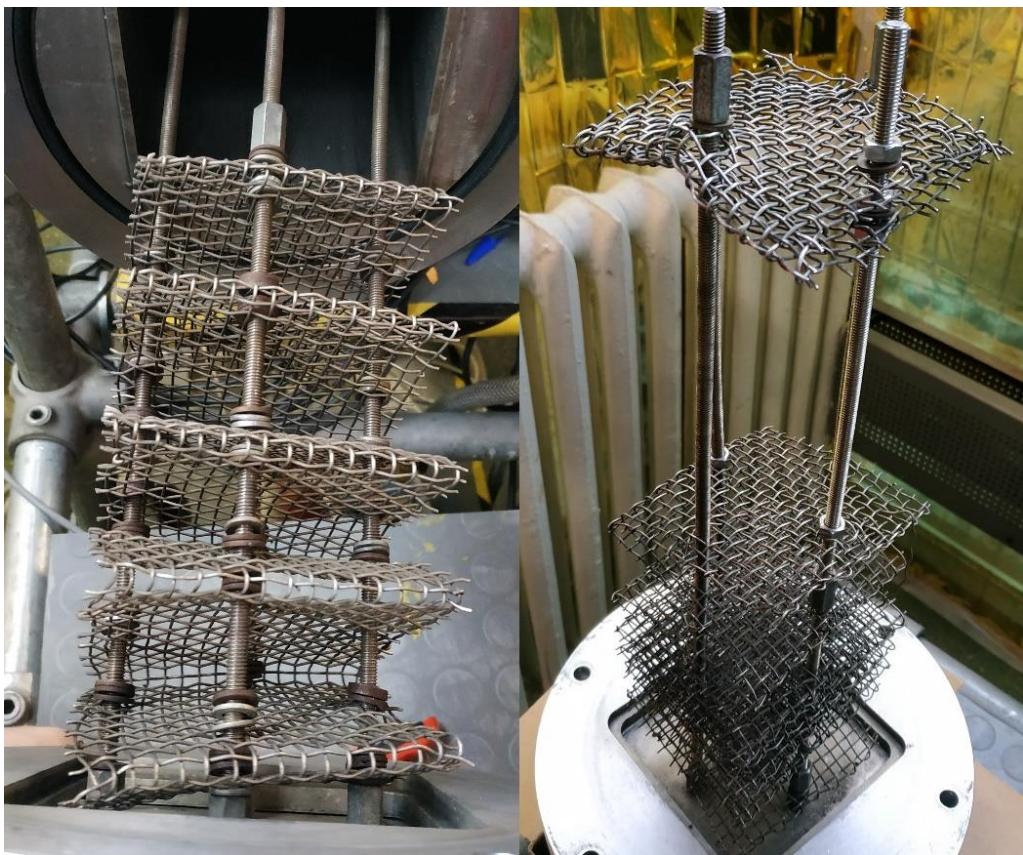
Rysunek 17 stanowisko badawcze konfiguracja 2



Rysunek 18 wnętrze rury detonacyjnej



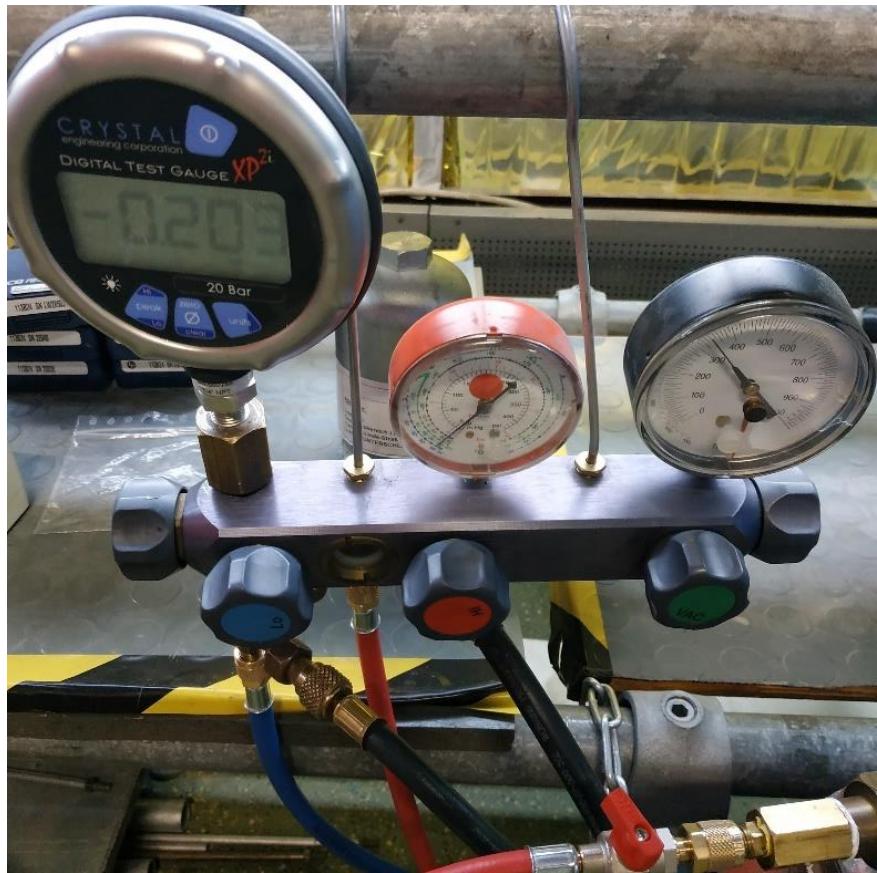
Rysunek 19 naroże skupiające



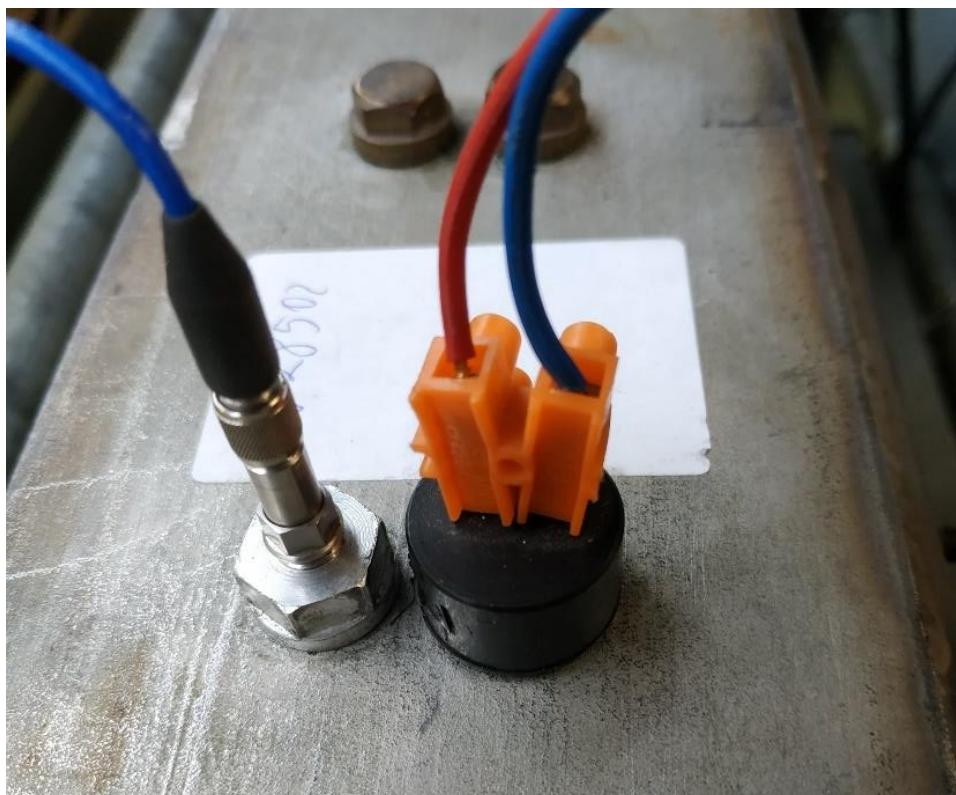
Rysunek 20 sekcja napędzającej różne konfiguracje



Rysunek 21 butle gazowe przy stanowisku badawczym



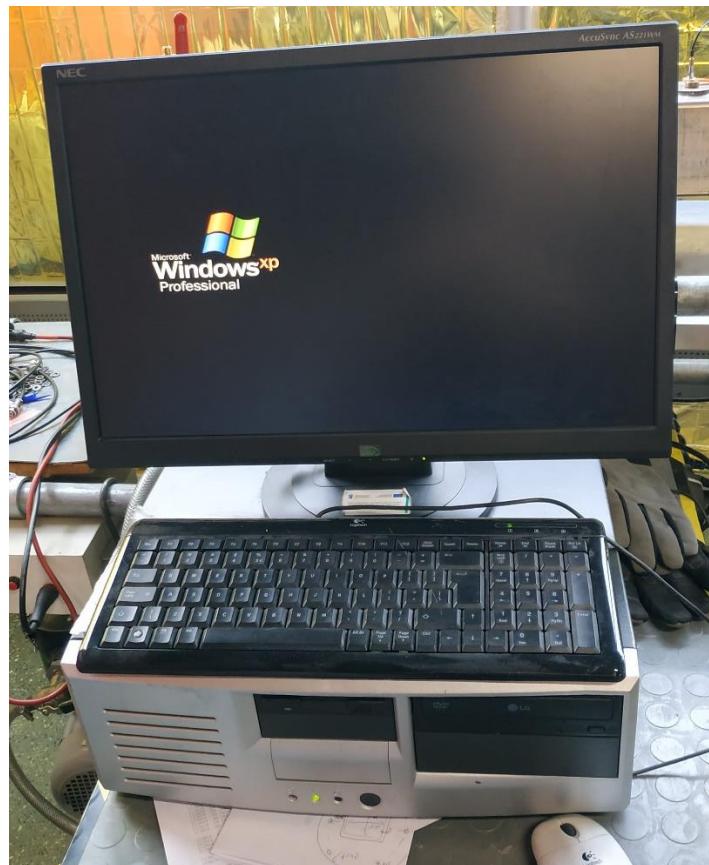
Rysunek 22 listwa rozdzielająca przepływ gazu



Rysunek 23 od lewej: czujnik ciśnienia oraz sonda jonizacyjna zamontowane do rury detonacyjnej



Rysunek 24 pompa próżniowa



Rysunek 25 komputer zbierający dane pomiarowe

## **4.2. Procedura badawcza**

Przed każdym przeprowadzonym badaniem należało starannie wykonać wszystkie czynności z poniższej procedury:

- 1) Uruchomienie wentylacji, jeśli jest dostępna.
- 2) Uruchomienie komputera z kartami pomiarowymi, sekwensera czasowego, wzmacniacza oraz układu zapłonowego.
- 3) Każdorazowe sprawdzenie szczelności poprzez opróżnienie rury pompą próżniową i kontrola wzrostu ciśnienia po osiągnięciu próżni na poziomie ~1mbar. Przy braku wzrostu ciśnienia w rurze o 1 mbar przez czas około 10 minut można napełnić rurę badaną mieszaniną gazową.
- 4) Napełnienie rury mieszaniną gazową do ciśnienia o wartości nieprzekraczającej 1 bar, następnie zamknięcie zaworów doprowadzających gaz, oczekanie 2 min do ustabilizowania się mieszaniny.
- 5) Sprawdzenie zamknięcia zaworów.
- 6) Uruchomienie systemu akwizycji danych i zapłon.
- 7) Opróżnienie rury ze spalin za pomocą pompy próżniowej, wychłodzenie rury, a następnie przygotowanie do kolejnego testu.

Czynności wykonywane po zakończeniu badań:

- 1) Kontrola zamknięcia wszystkich zaworów (w tym tych na butli).
- 2) Kontrola opróżnienia spalin z rury i zapowietrzenia.
- 3) Wyłączenie układów zasilających układy pomiarowe.
- 4) Wyłączenie wentylacji.

## 5. Opis wyników i ich analiza

Przeprowadzono 50 pojedynczych eksperymentów, w tym 6 testowych w celu dobrania odpowiednich wartości czasowych dla sekwensera czasowego dla mieszanin wodorowo-powietrznych o stężeniach wodoru: 29,6%, 25%, 40% oraz 35%.

Poniższa tabela przedstawia informację odnośnie wykonanych badań.

Tabela 2 zestawienie wykonanych eksperymentów

L.p.	Liczba eksperymentów	Współczynnik ekwiwalencji $\Phi$ [-]	Stężenie wodoru [%]
1	14	1	29,6 (stekiometry)
2	8	0,8	25
3	16	1,6	40
4	6	1,28	35

Współczynnik ekwiwalencji określa się jako:

$$\Phi = \frac{\frac{F}{A}}{\left(\frac{F}{A}\right)_{\text{stoich}}}$$

Jest to wartość bezwymiarowa.

Gdzie:

$\left(\frac{F}{A}\right)$  – stosunek paliwa do powietrza mieszanki badanej

$\left(\frac{F}{A}\right)_{\text{stoich}}$  – stosunek paliwa do powietrza mieszanki stechiometrycznej

Zarejestrowane przez komputer dane to przebiegi czujników ciśnienia i sond jonizacyjnych w funkcji czasu. Czujniki pomiaru ciśnienia poza samym faktem zadziałania, czyli wskazaniem konkretnego momentu dotarcia fali ciśnieniowej, dają pomiar wartości ciśnienia w całym oknie pomiarowym. W przypadku sond jonizacyjnych istotny jest wzrost napięcia na sondzie, który pozwala określić moment dotarcia płomienia, konkretna wartość napięcia nie jest kluczowa. Na podstawie przebiegów zarejestrowanych przez czujniki otrzymano wykresy ToA, które wskazują czas aktywacji czujników pomiaru ciśnienia i sond, a to przekłada się na odnotowanie położenia frontu fali ciśnieniowej i frontu płomienia w funkcji położenia wzdłuż rury detonacyjnej. Znając czas dotarcia płomienia i fali oraz konkretne odległości między czujnikami otrzymano wykresy uśrednionych prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia  $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ . Ostatnimi wygenerowanymi wykresami są wykresy zbiorcze ciśnienia dla poszczególnych czujników położonych wzdłuż rury, na których można zaobserwować propagację fali, moment odbicia, towarzyszące mu ciśnienie oraz powrót fali ciśnieniowej.

W celu analizy zebranych danych napisano dedykowany skrypt w języku programowania python (załącznik 1). Skrypt odczytuje dane pomiarowe wykonanych eksperymentów oraz opisy wykonanych pomiarów, w tym odległości zamontowanych czujników, a także identyfikuje parametry użytych czujników. Surowe dane czujników wyrażone w napięciu są przeliczane na wartości ciśnienia w MPa, natomiast dane z sond jonizacyjnych pozostawiane są

w wartościach napięciowych. Z zebranych danych obliczono wartości ToA poprzez ustawienie wartości progowej aktywacji czujnika. Posiadając czasy dotarcia  $t_i$  i odległości między czujnikami  $x_i$ , skrypt oblicza prędkość średnią płomienia i fali między czujnikami. Zaimplementowany wzór:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{x_{i+1} - x_i}{t_{i+1} - t_i} \text{ gdzie } i \text{ oznacza numer konkretnego czujnika}$$

Następnie odczytywane są czasy powrotnej fali ciśnieniowej i obliczana jest prędkość tuż po odbiciu fali (pomiary z dwóch ostatnich czujników). Z obliczonych wyników rysowane są wykresy wskazań czujników, ToA, propagacji fali wzdłuż rury oraz prędkości fali i płomienia. Dla przypadku wykresów prędkości dodatkowo uśredniane są niefizyczne piki wartości prędkości. Jeżeli prędkość przekraczała dwukrotną średnią prędkość sąsiadujących czujników, to zmieniana jest ta prędkość na średnią arytmetyczną sąsiadujących prędkości. Wynikało to z faktu, że czujniki nie są idealne, odległości między czujnikami są rzędu  $10^{-1}$  m, a mierzone czasy są w mikrosekundach. Zatem najmniejsze odchylenia od rzeczywistych wartości powodowały znieształcenia wyników prędkości. Z zebranych danych mówiących o fizyce naroża, program rysuje wykresy zbiorcze dla wszystkich mieszanin, są to wykresy: opóźnienia zapłonu w funkcji prędkości fali ciśnieniowej w momencie uderzenia w naroże, opóźnienia zapłonu w funkcji maksymalnego ciśnienia w narożu oraz zestawienie opóźnienia zapłonu dla różnych stężeń mieszaniny. Z uwagi na duże zakłócenia czujnika ciśnienia nr 3 w konfiguracji 1 stanowiska badawczego, czujnik ten jest wyzerowany po pierwszej aktywacji. Wykorzystano program Gaseq w celu wyliczenia i zaprezentowania na wykresach prędkości detonacji  $V_{CJ}$  oraz prędkość dźwięku w spalinach  $a_p$ .

## 5.1 Badanie mieszaniny stechiometrycznej o współczynniku ekwiwalencji $\Phi = 1$

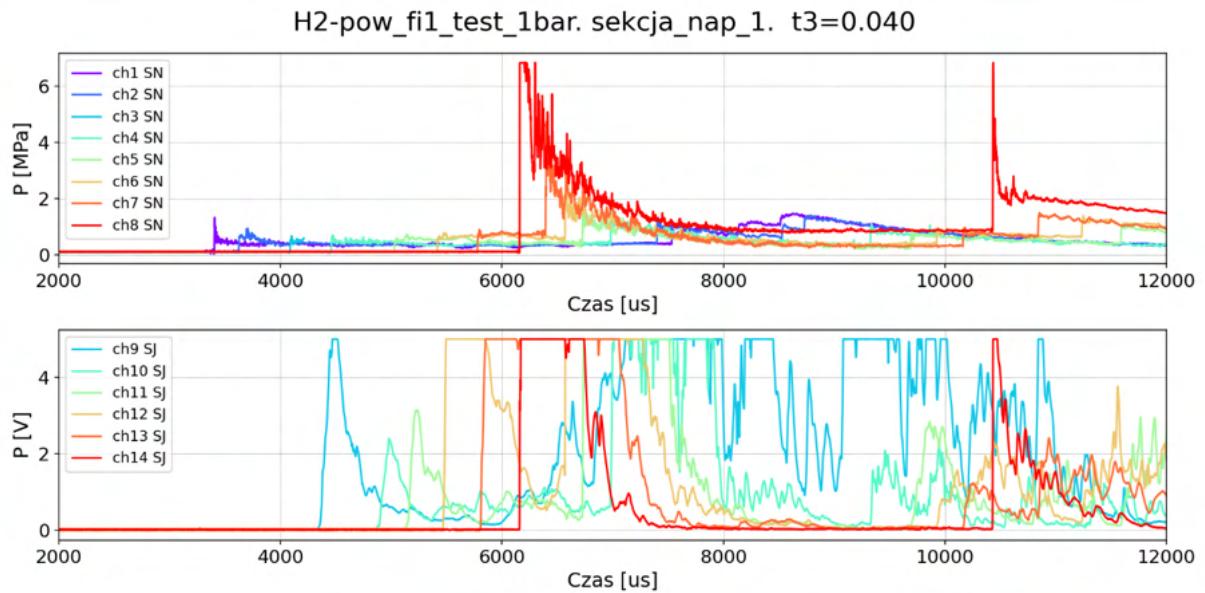
Badania zaczęto od stechiometrycznej mieszaniny wodorowo-powietrznej o zawartości wodoru 29,6% ( $\Phi = 1$ ). Wykonano 14 prób dla różnych konfiguracji siatek sekcji napędzającej (tabela 3), dla których otrzymano różne przebiegi i charakterystyki badanego zjawiska.

Tabela 3 konfiguracje sekcji napędzającej mieszaniny  $\Phi = 1$

Konfiguracja 1 stanowiska badawczego	
Eksperyment 1	1 człon sekcji
Eksperyment 2	1 człon sekcji
Eksperyment 3	1 człon sekcji – 1 warstwa
Eksperyment 4	1 człon sekcji – 1 warstwa
Eksperyment 5	1 człon sekcji – 0,5 warstwy
Eksperyment 6	1 człon sekcji + 2 warstwy
Eksperyment 7	1 człon sekcji + 2 warstwy
Eksperyment 8	1 człon sekcji + 2 warstwy
Eksperyment 9	1 człon sekcji + 2 warstwy
Eksperyment 10	1 człon sekcji + 2 warstwy
Konfiguracja 2 stanowiska badawczego	
Eksperyment 11	1 człon sekcji + 2 warstwy
Eksperyment 12	1 człon sekcji + 4 warstwy
Eksperyment 13	1 człon sekcji + 4 warstwy
Eksperyment 14	1 człon sekcji + 4 warstwy

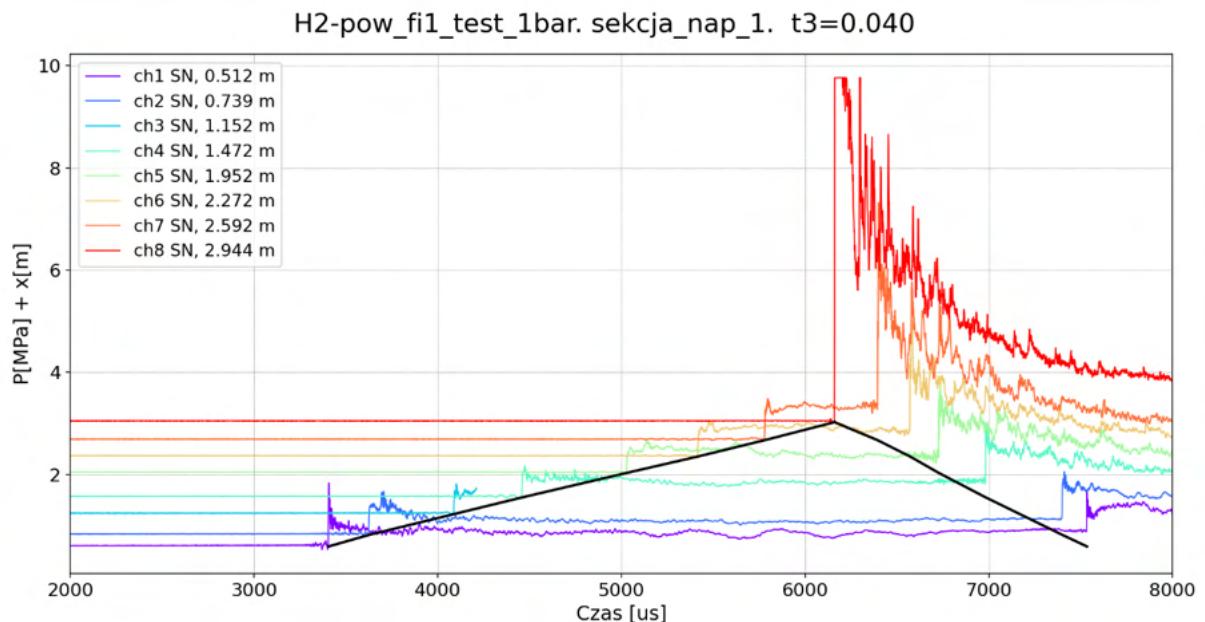
## Eksperyment 1.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



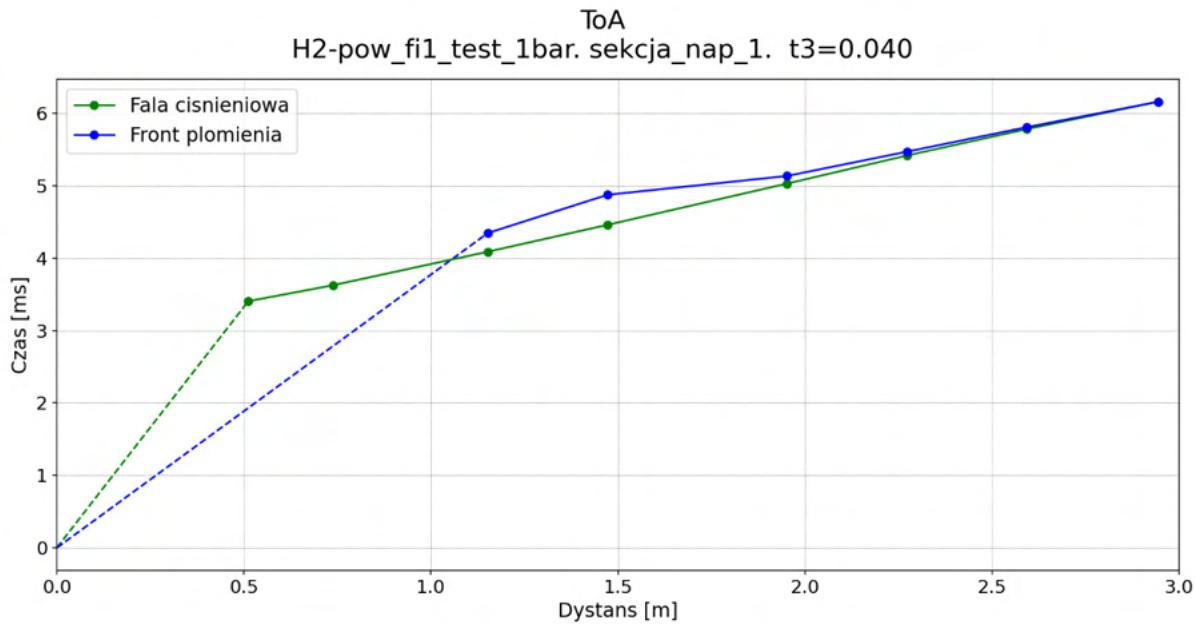
Rysunek 26 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



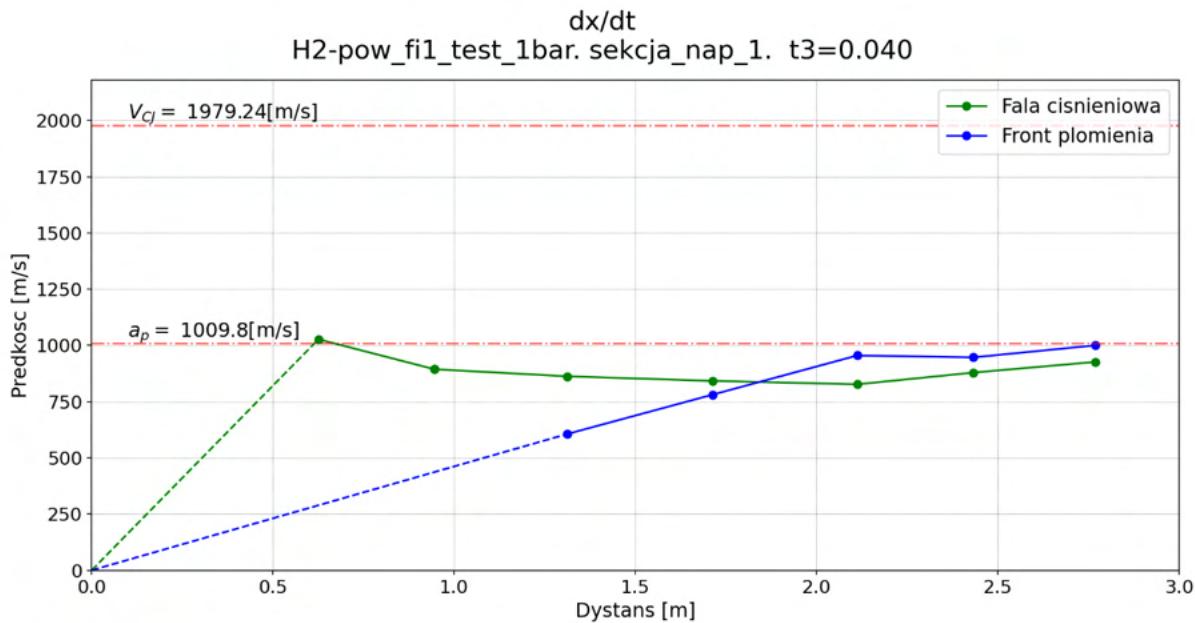
Rysunek 27 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 28 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

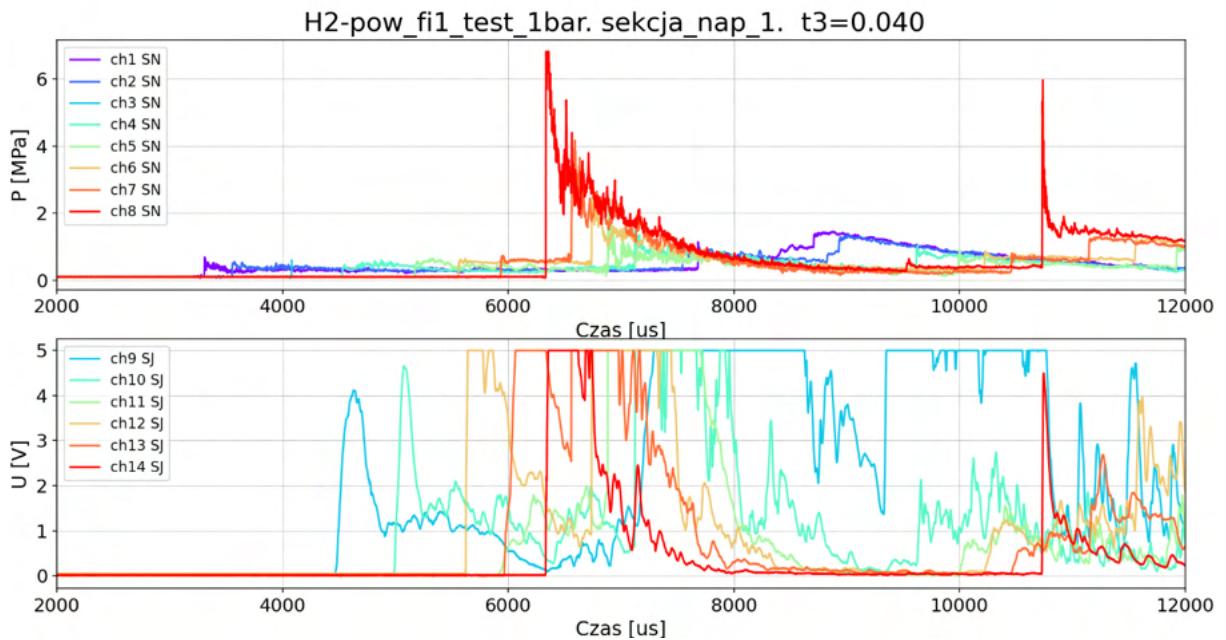


Rysunek 29 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Gwałtowny skok ciśnienia na ostatnim czujniku oraz skok napięcia na sondzie miały miejsce w tym samym czasie (IDT = 1 us). Maksymalna wartość ciśnienia ponad zakres. W przybliżeniu stała prędkość fali ciśnieniowej widocznej na czarnej krzywej rosnącej do momentu odbicia (rys. 27). Powrót fali z prędkością większą i w przybliżeniu stałą. Liniowy w przybliżeniu wzrost prędkości frontu płomienia. Od połowy długości rury prędkość płomienia i fali podobne. Liniowy czas dotarcia fali ciśnieniowej wzduł rury detonacyjnej, front płomienia również o charakterze liniowym z opóźnieniem w stosunku do fali ciśnieniowej. Doszło do detonacji w narożu. Prędkość detonacji po odbiciu wynosi 1504,3 m/s.

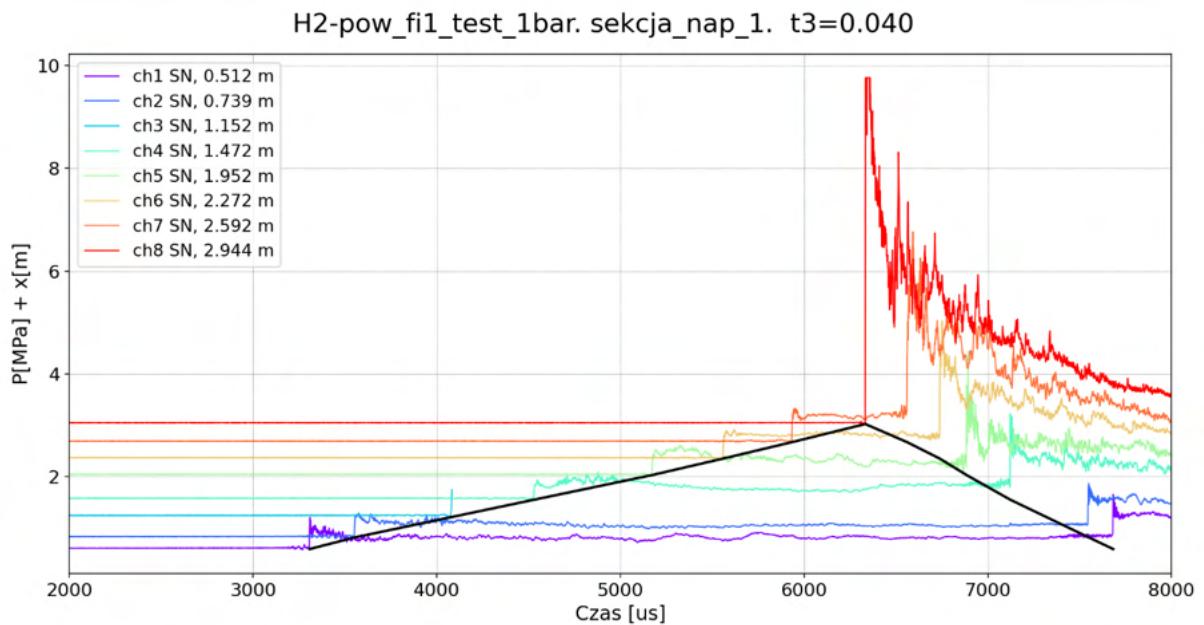
## Eksperyment 2.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



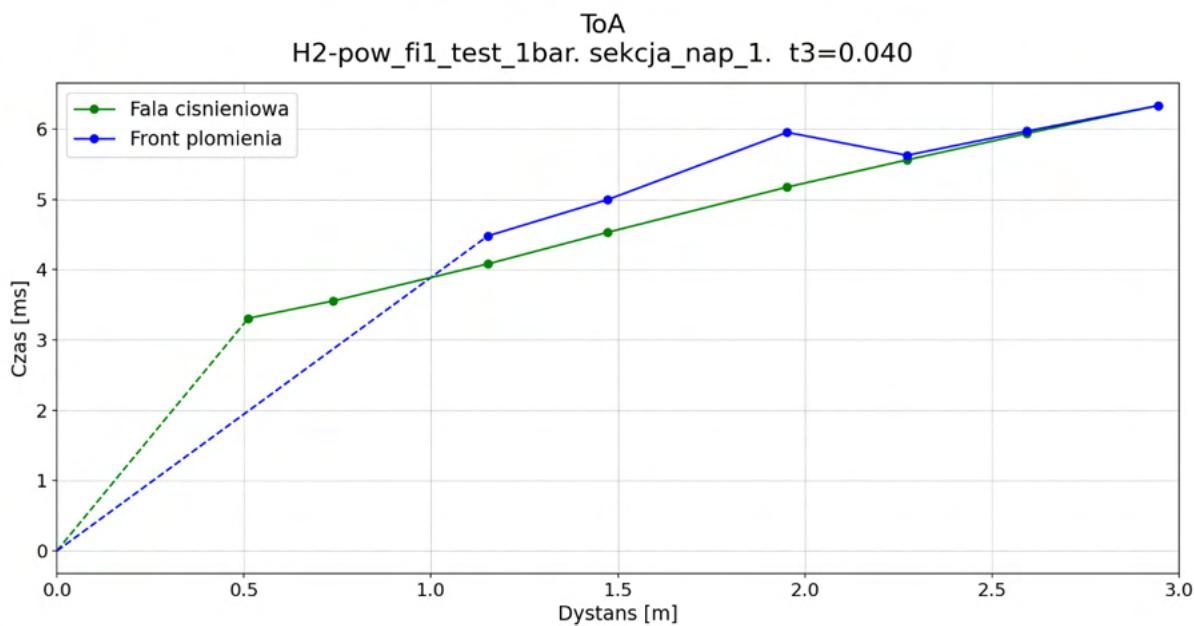
Rysunek 30 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



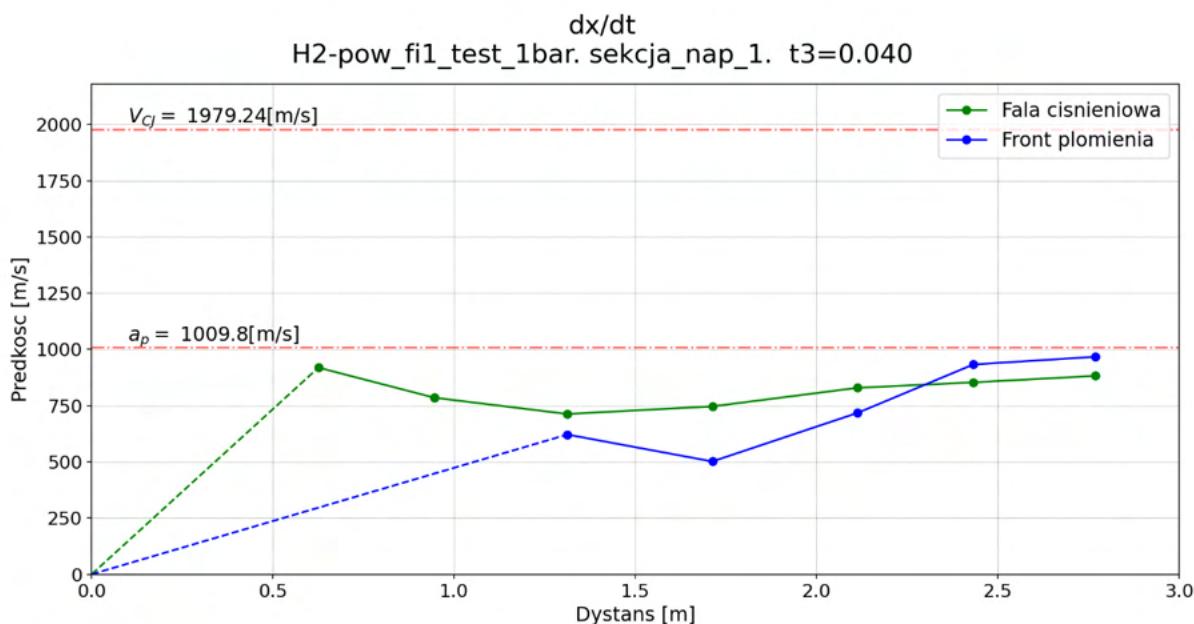
Rysunek 31 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykresy ToA:



Rysunek 32 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

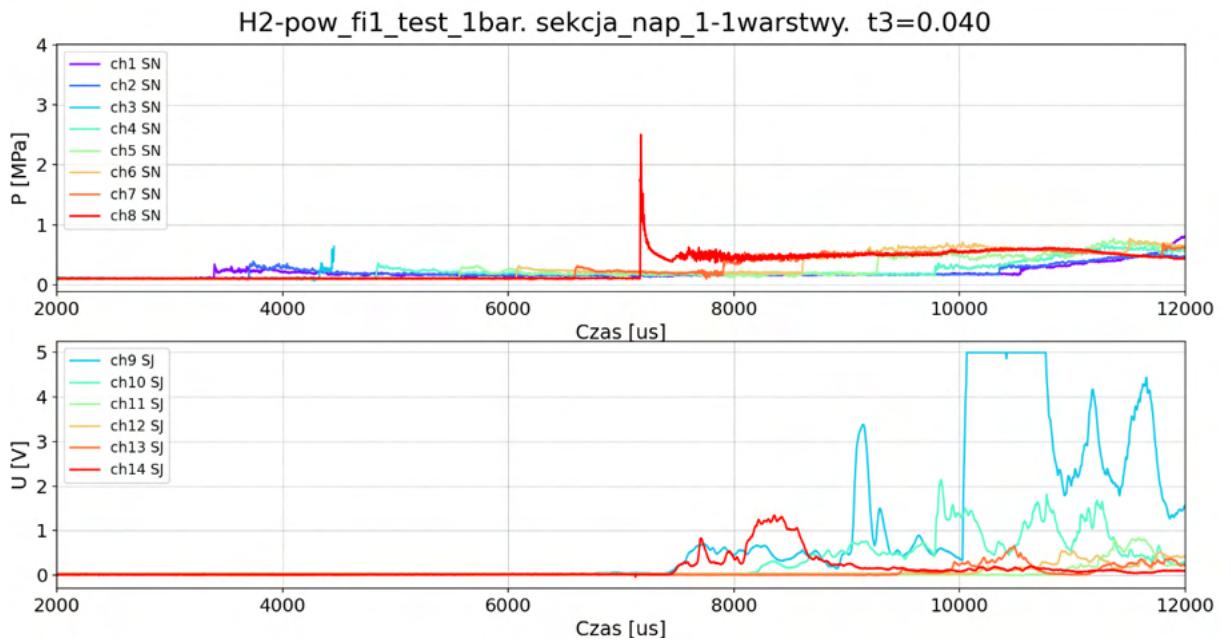


Rysunek 33 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Gwałtowny skok ciśnienia na ostatnim czujniku ciśnienia oraz zapłon miały miejsce w tym samym czasie (IDT = 1 us). Wartość ciśnienia przekracza zakres pomiarowy czujnika. Fala ciśnieniowa w przybliżeniu propaguje ze stałą prędkością wzdłuż kanału, po odbiciu powrót fali z prędkością większą i w przybliżeniu stałą. Wzrost prędkości frontu płomienia wzdłuż rury. Od okolicy 2,25 m długości rury prędkość płomienia przewyższa prędkość fali ciśnieniowej. Widoczne cofnięcie się płomienia wtórnego z zapłonu w narożu w kierunku płomienia pierwotnego. Detonacja w narożu. Prędkość detonacji po odbiciu wynosi 1550,7 m/s.

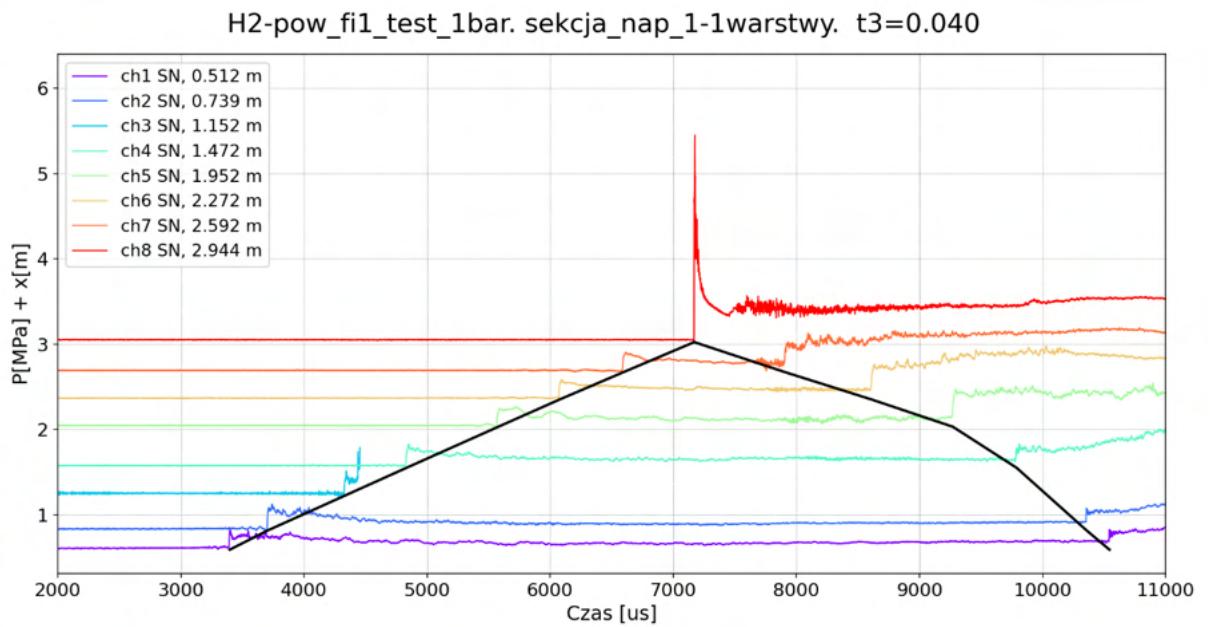
### Eksperyment 3.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



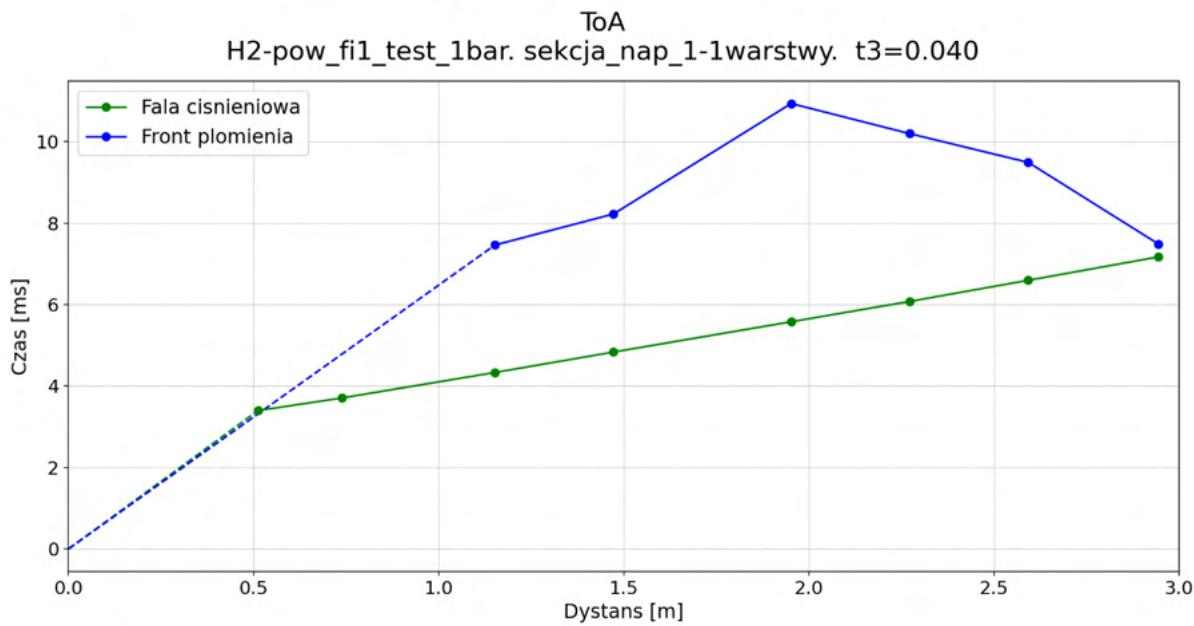
Rysunek 34 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



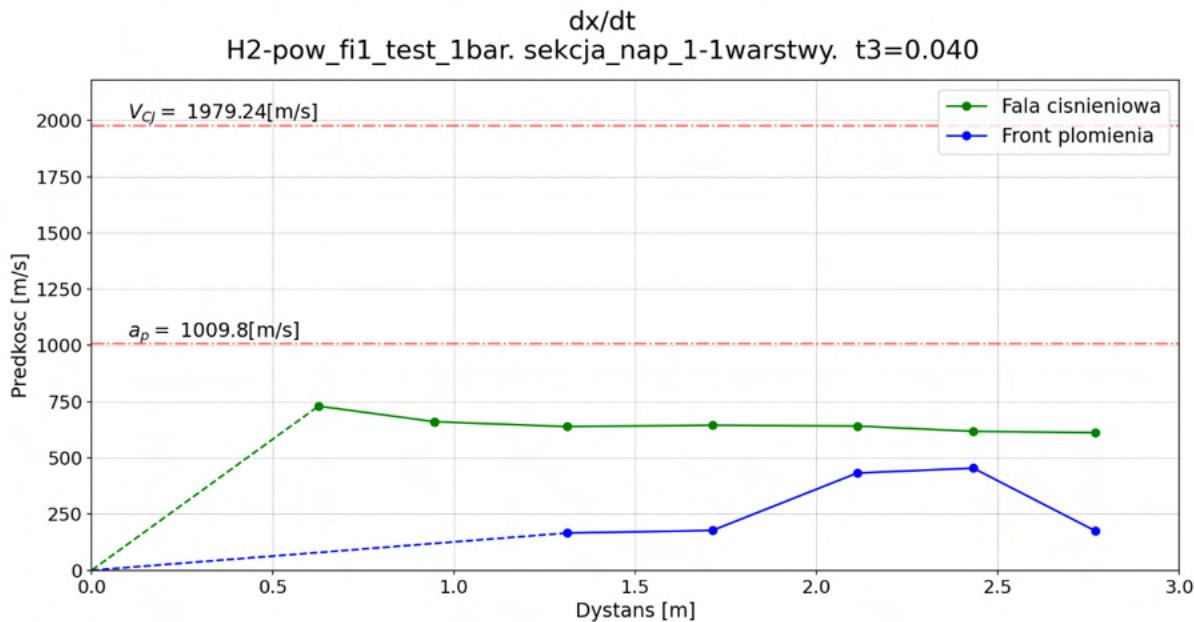
Rysunek 35 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykresy ToA:



Rysunek 36 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

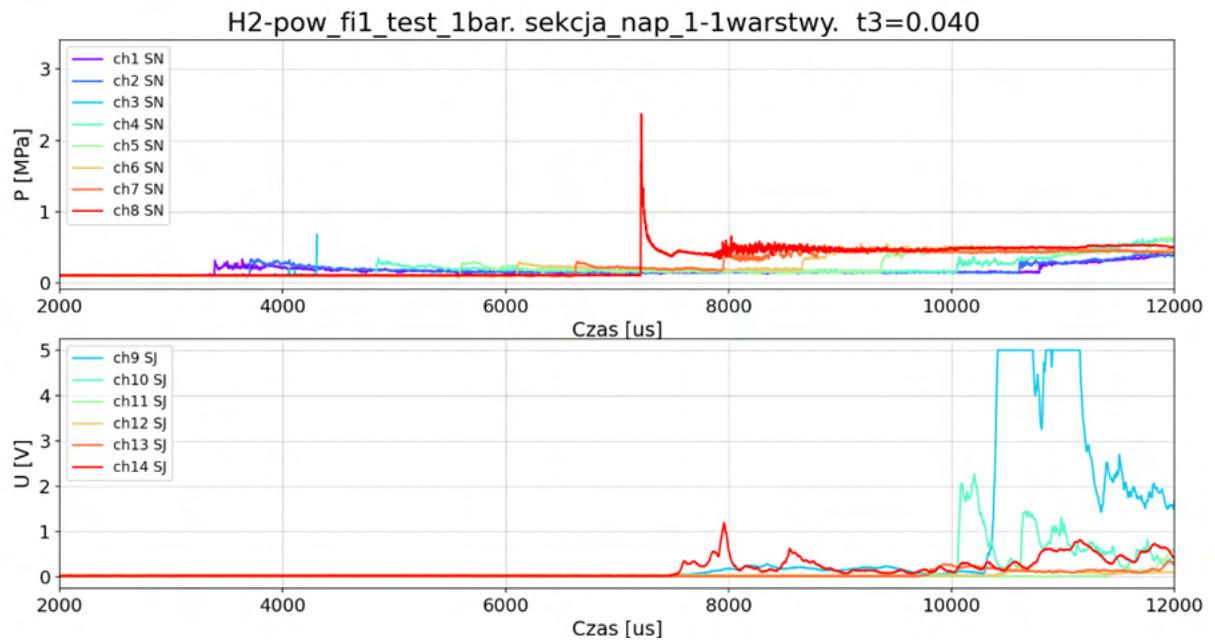


Rysunek 37 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Niskie ciśnienie w narożu o wartości 2,5 MPa. Duże opóźnienia między czujnikami ciśnienia i sond, w narożu o wartości 314 us. W przybliżeniu stała prędkość fali ciśnieniowej widocznej na czarnej krzywej rosnącej do momentu odbicia. Powracająca fala przyspiesza wraz z odległością. Zaobserwowano dwa płomienie, pierwotny oraz wtórny zainicjowany w narożu, który propaguje w kierunku płomienia pierwotnego. Front płomienia przyspiesza, w okolicach 2-2,5 m prędkość stała, a następnie prędkość liniowo zwalnia. Opóźniony zapłon w narożu.

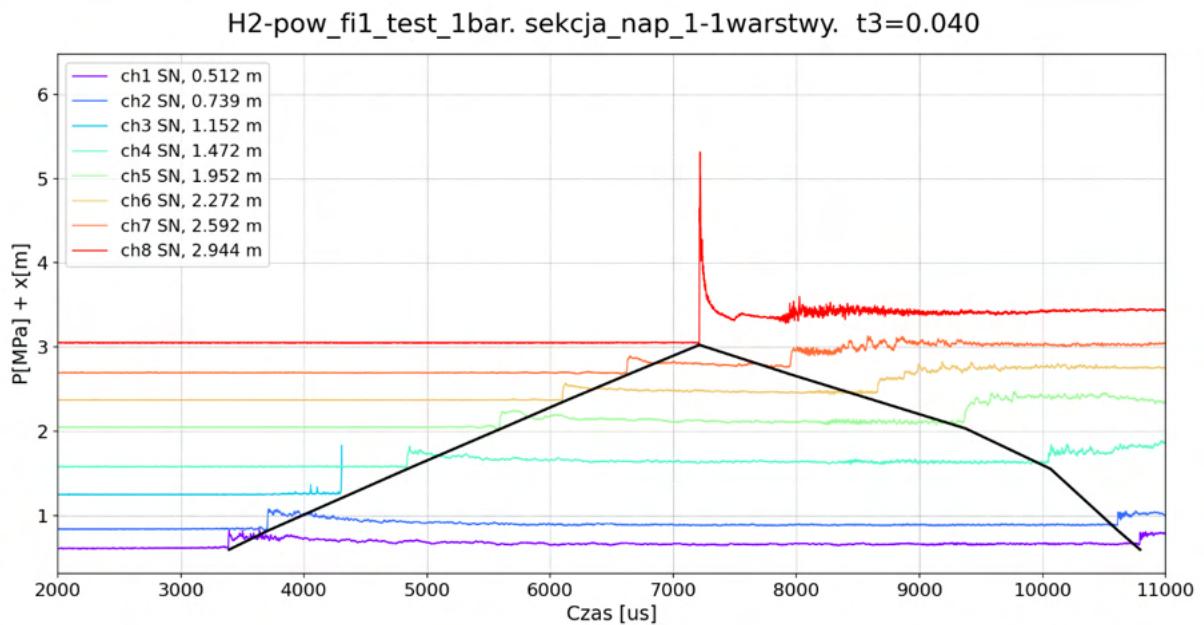
## Eksperyment 4.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



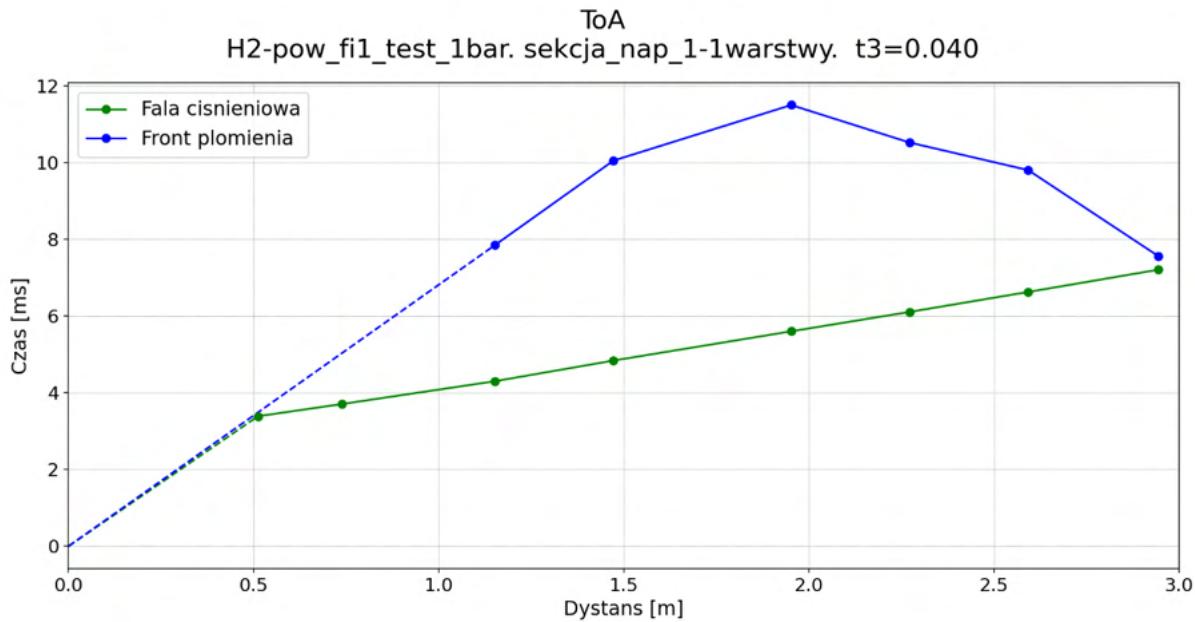
Rysunek 38 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



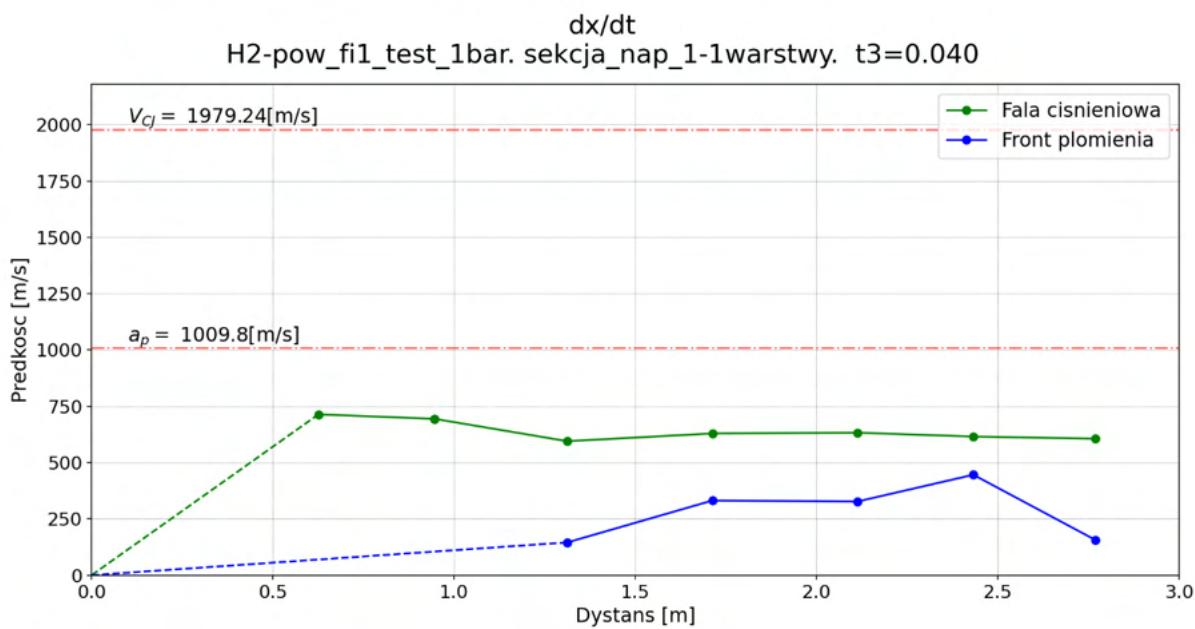
Rysunek 39 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykresy ToA:



Rysunek 40 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

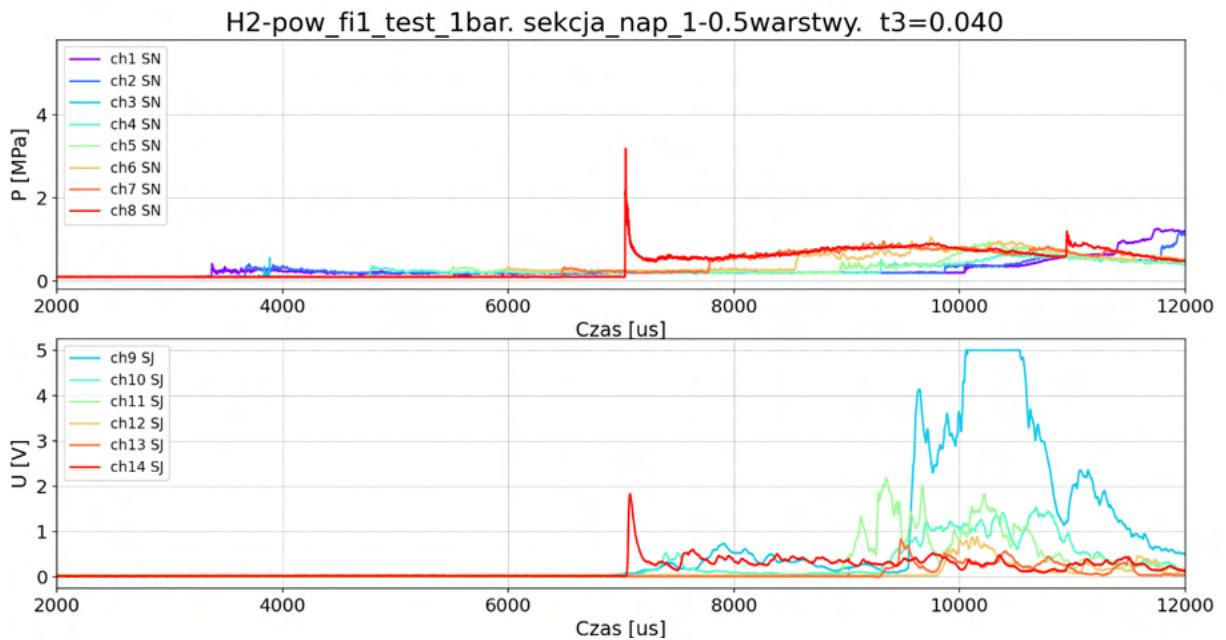


Rysunek 41 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Niski wzrost ciśnienia w narożu do wartości 2,37 MPa. Duże opóźnienia między czujnikami ciśnienia i sondą, opóźnienie w narożu o wartości 350 us. Stała w przybliżeniu prędkość fali ciśnieniowej widocznej na czarnej krzywej rosnącej do momentu odbicia. Powracająca fala przyspiesza wraz z odległością. Zaobserwowano dwa płomienie: pierwotny i wtórny powstały w narożu propagujące naprzeciwko siebie. Front płomienia przyspiesza do ok. 2,45 m długości rury, następnie zwalnia. Opóźniony zapłon w narożu.

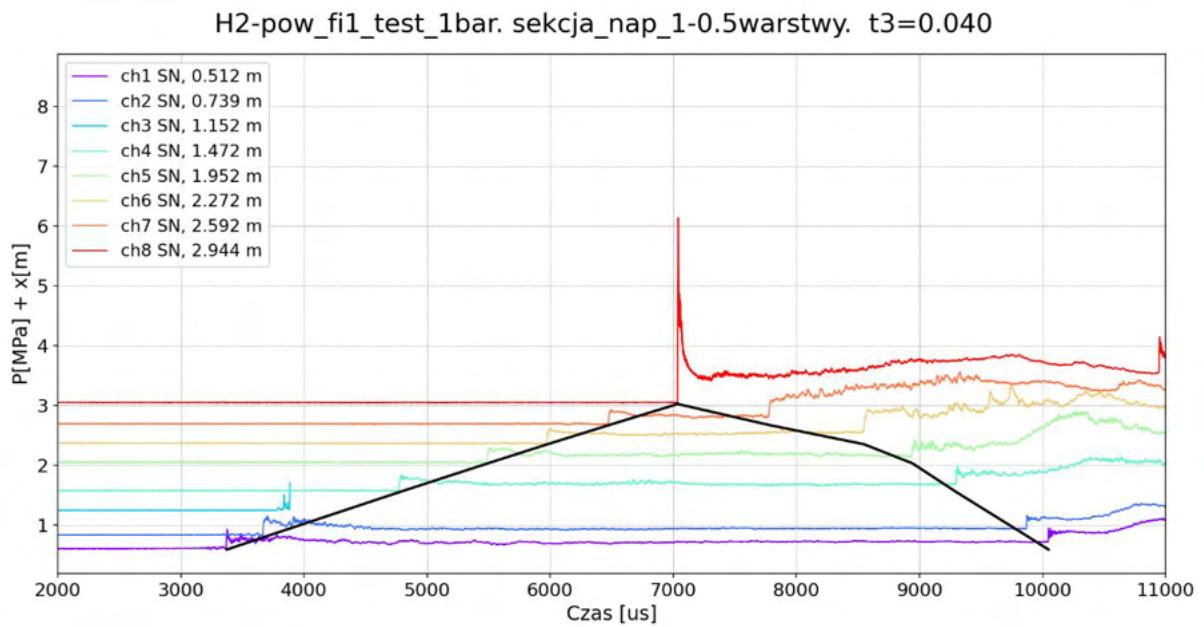
## Eksperyment 5.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



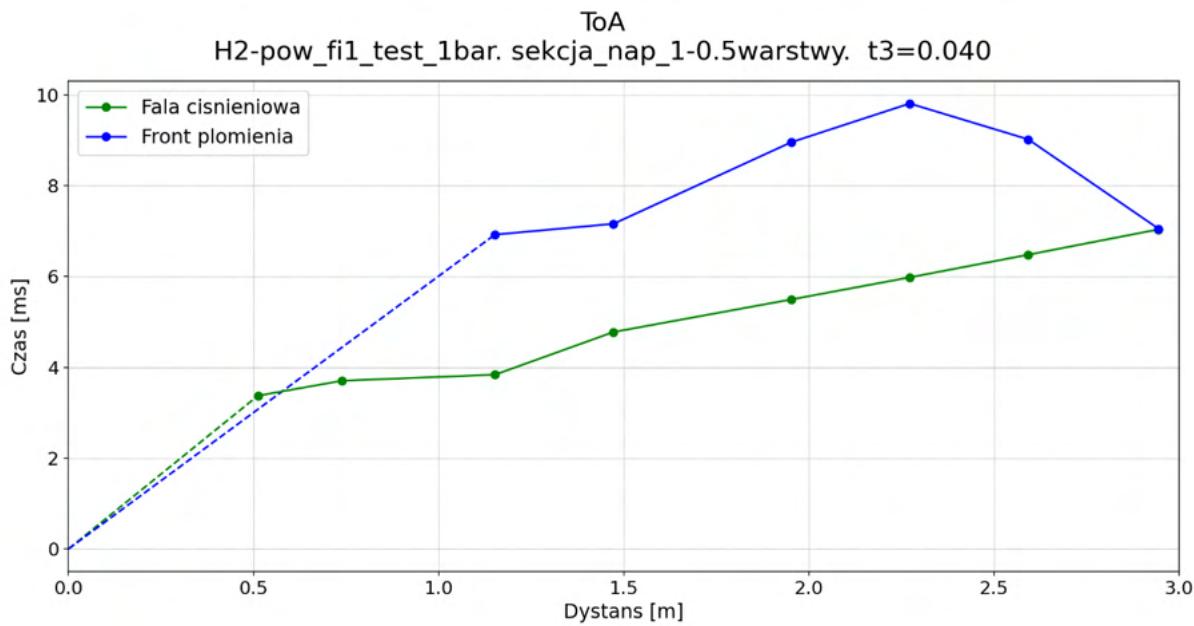
Rysunek 42 Eksperyment 5 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



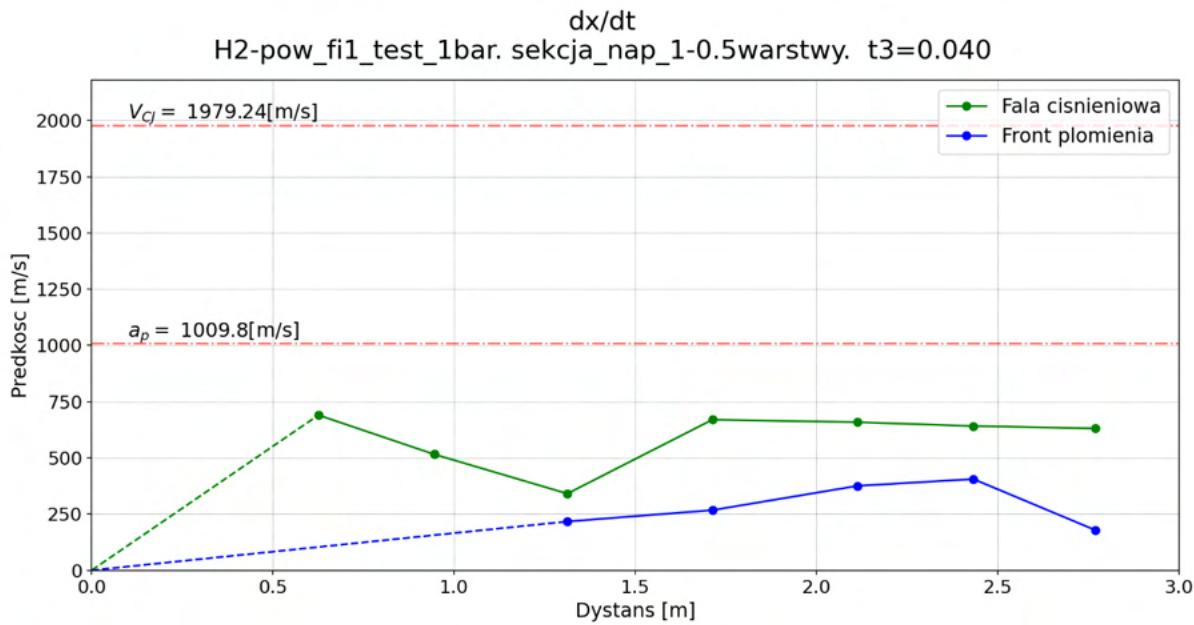
Rysunek 43 Eksperyment 5 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykresy ToA:



Rysunek 44 ( $\Phi = 1$ ) Eksperyment 5 wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

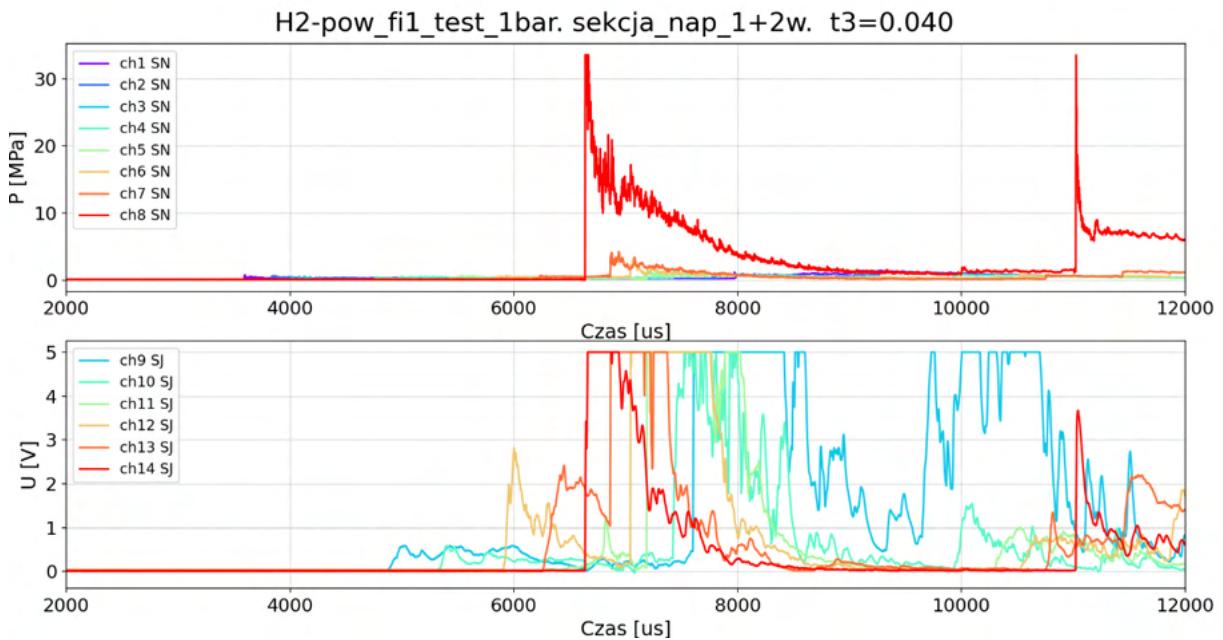


Rysunek 45 Eksperyment 5 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie maksymalne w narożu 3,2 MPa. Różnica czasowa między aktywacją ostatniej sondy a ostatnim czujnikiem wynosi 14 us. Stała w przybliżeniu prędkość fali ciśnieniowej do momentu odbicia, następnie odbita fala przyspiesza. Obserwowane dwa płomienie, wtórny płomień cofa się w kierunku pierwotnego zapłonu. Nierealny przebieg prędkości w pierwszej połowie rury dla fali ciśnieniowej, uznano, że prędkość w całej sekcji badawczej stała (niewłaściwy odczyt trzeciego czujnika ciśnienia). Front płomienia stale przyspiesza do ok. 2,45 m wzdłuż rury, następnie zwalnia. Opóźniony zapłon w narożu.

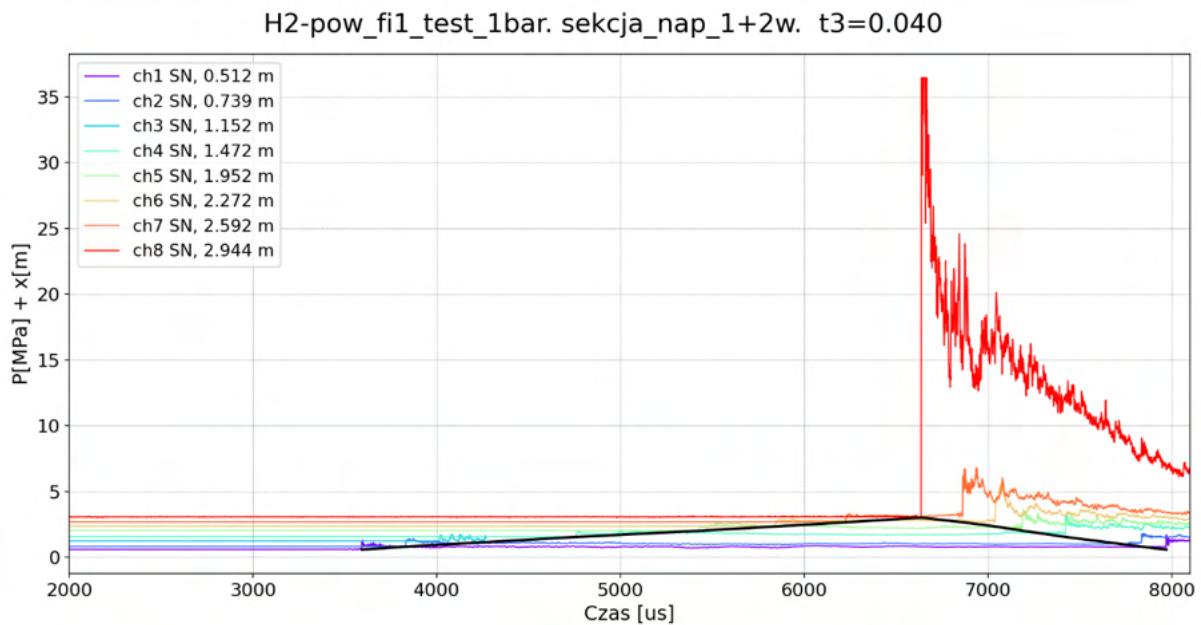
## Eksperyment 6.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



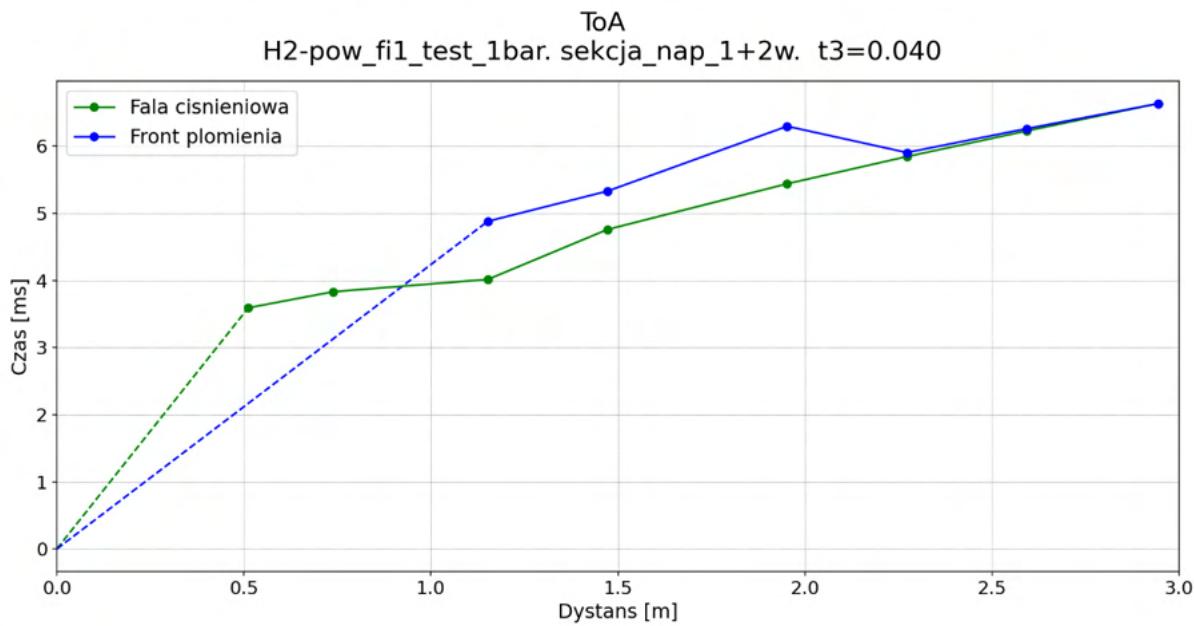
Rysunek 46 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



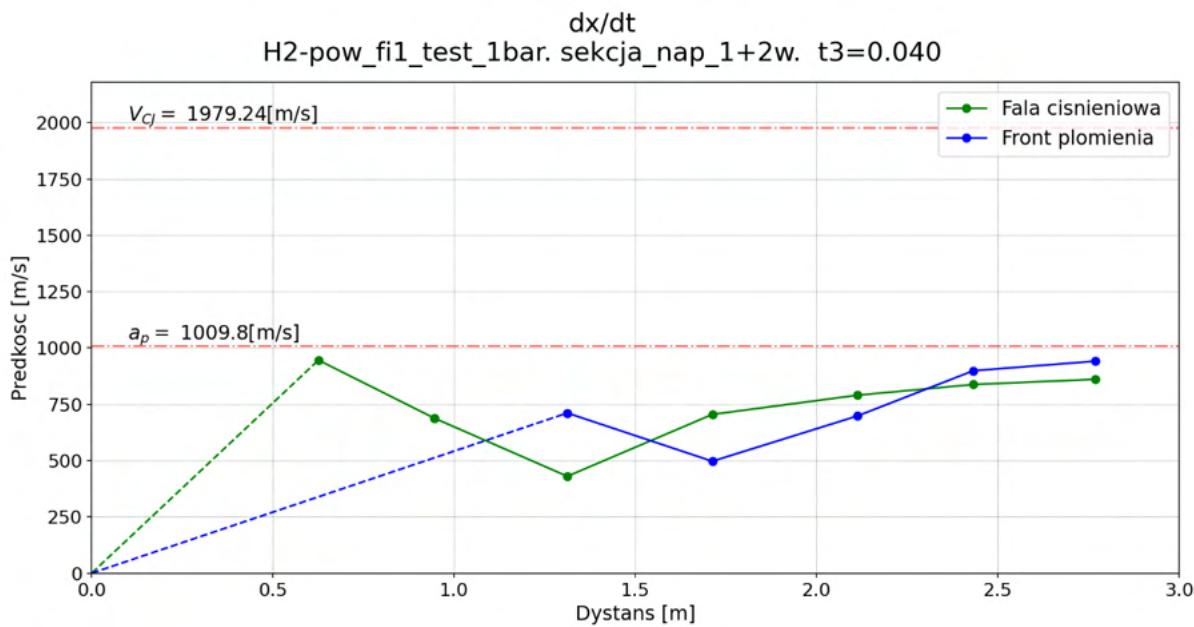
Rysunek 47 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykresy ToA:



Rysunek 48 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

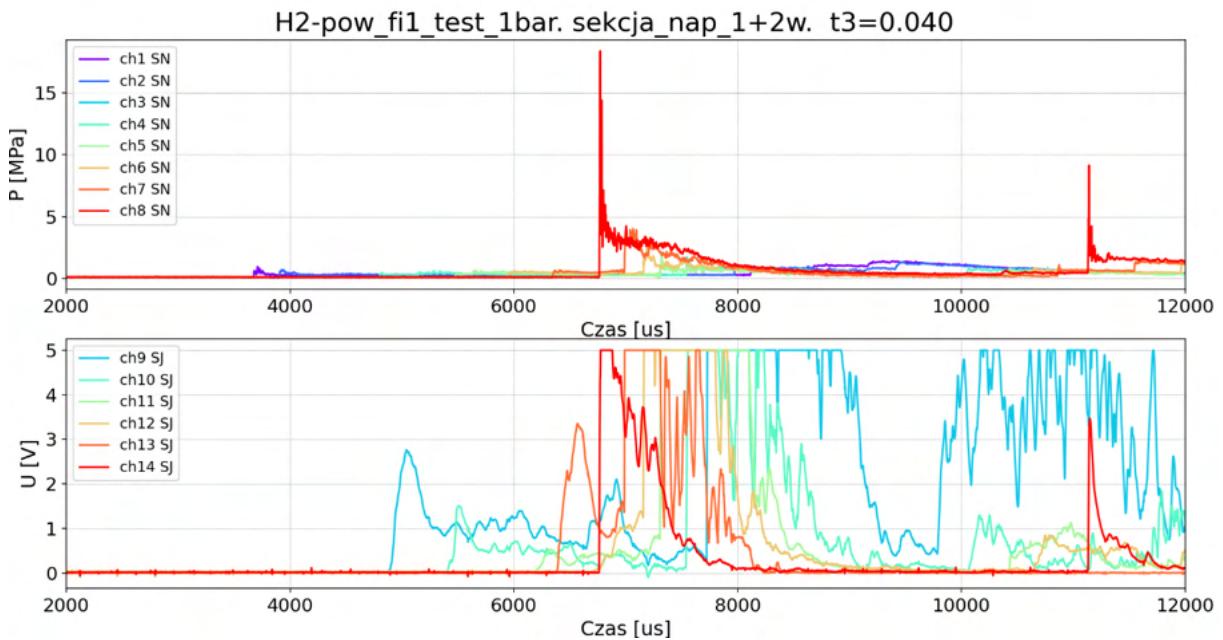


Rysunek 49 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Skokowy wzrost ciśnienia w narożu do wartości 33,3 MPa. Wartość rzeczywista ciśnienia jest wyższa niż 33,3 MPa (maksymalny zakres), gdyż widoczne jest obcięcie piku ciśnienia czujnika nr 5. Aktywacja ostatniej sondy jonizacyjnej i czujnika ciśnienia nastąpiła w tym samym momencie. Stała w przybliżeniu prędkość fali do chwili odbicia, powrót fali w przybliżeniu ze stałą, większą prędkością. Prawdopodobnie zniekształcony przy ściankach płomień powoduje przedwczesną aktywację sondy nr 4. Nierzeczywisty, zmniejszający prędkość przebieg fali ciśnieniowej do ok. 1,3 m (błędny odczyt czujnika nr 3). Front zwalnia do ok. 1,7 m, a następnie przyspiesza do prędkości wyższej niż fala. Detonacja w narożu z umowną wartością IDT = 1 us. Prędkość detonacji po odbiciu wynosi 1557,7 m/s.

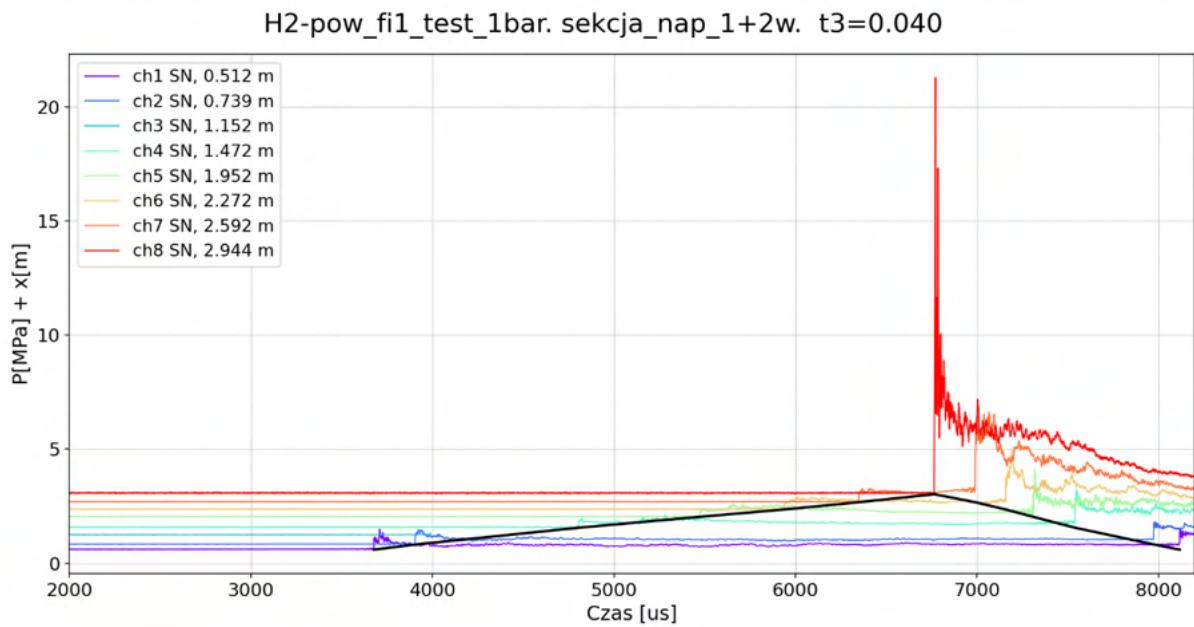
## Eksperyment 7.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



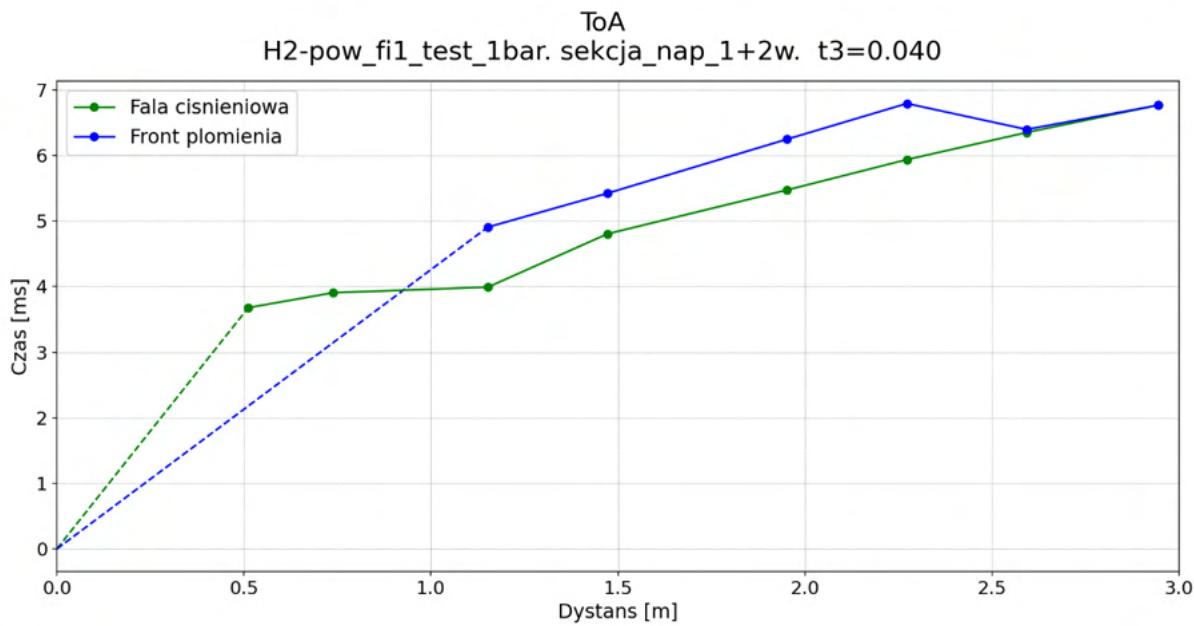
Rysunek 50 Eksperyment 7 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



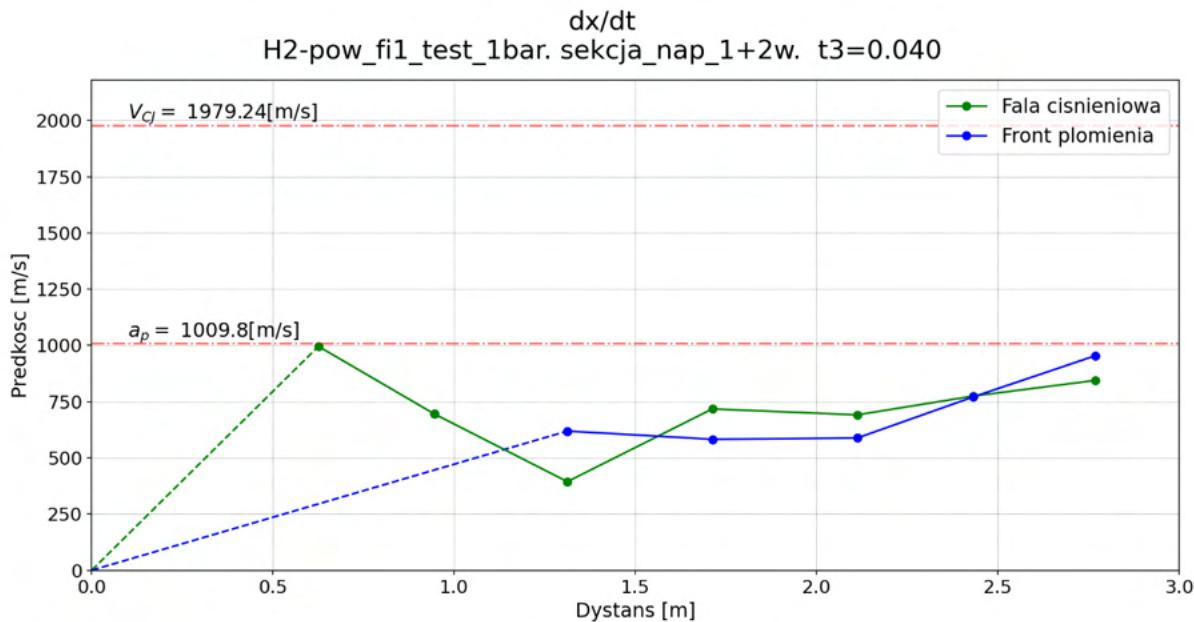
Rysunek 51 Eksperyment 7 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykresy ToA:



Rysunek 52 Eksperyment 7 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

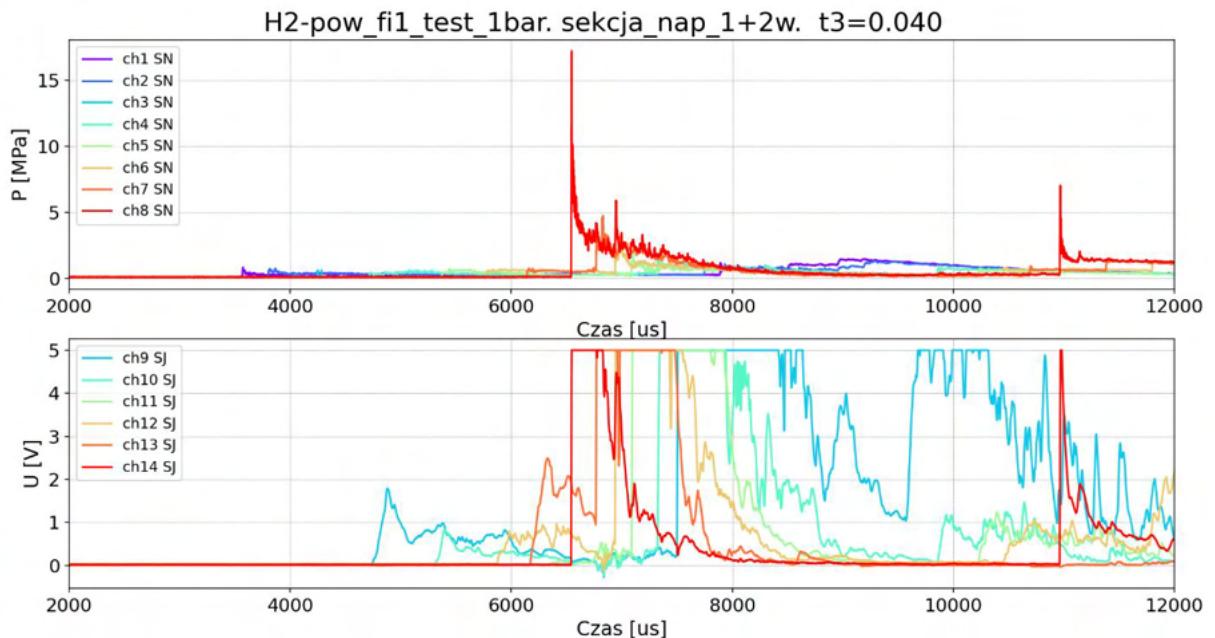


Rysunek 53 Eksperyment 7 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Wzrost ciśnienia w narożu do wartości 18,3 MPa. Sonda jonizacyjna i czujnik w narożu aktywowane jednocześnie. Stała w przybliżeniu prędkość fali ciśnieniowej do momentu odbicia w narożu. Po odbiciu powrót fali w przybliżeniu ze stałą, większą prędkością. Prawdopodobnie zniekształcony płomień powoduje przedwczesną aktywację przedostatniej sondy. Przebieg fali ciśnieniowej nierzeczywisty do ok. 1,3 m długości rury (błędny odczyt czujnika nr 3). Prędkość frontu płomienia w przybliżeniu stała do ok. 2,2 m wzdłuż rury, następnie prędkość rośnie. Detonacja w narożu IDT = 1 us. Prędkość detonacji po odbiciu wynosi 1564,4 m/s.

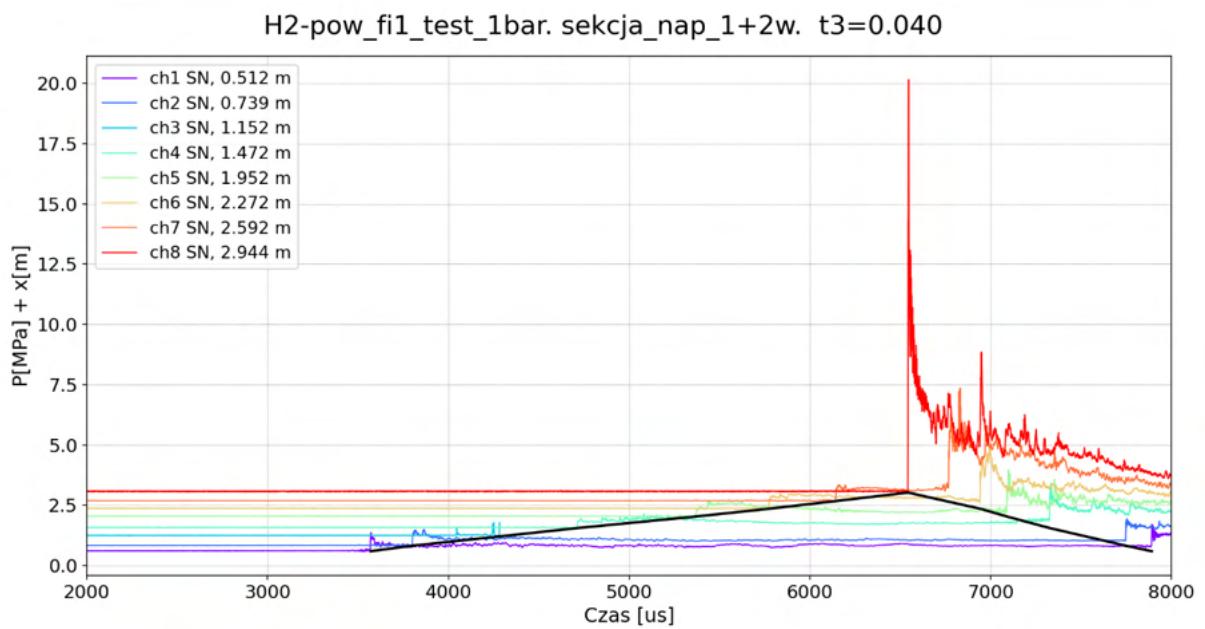
## Eksperyment 8.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



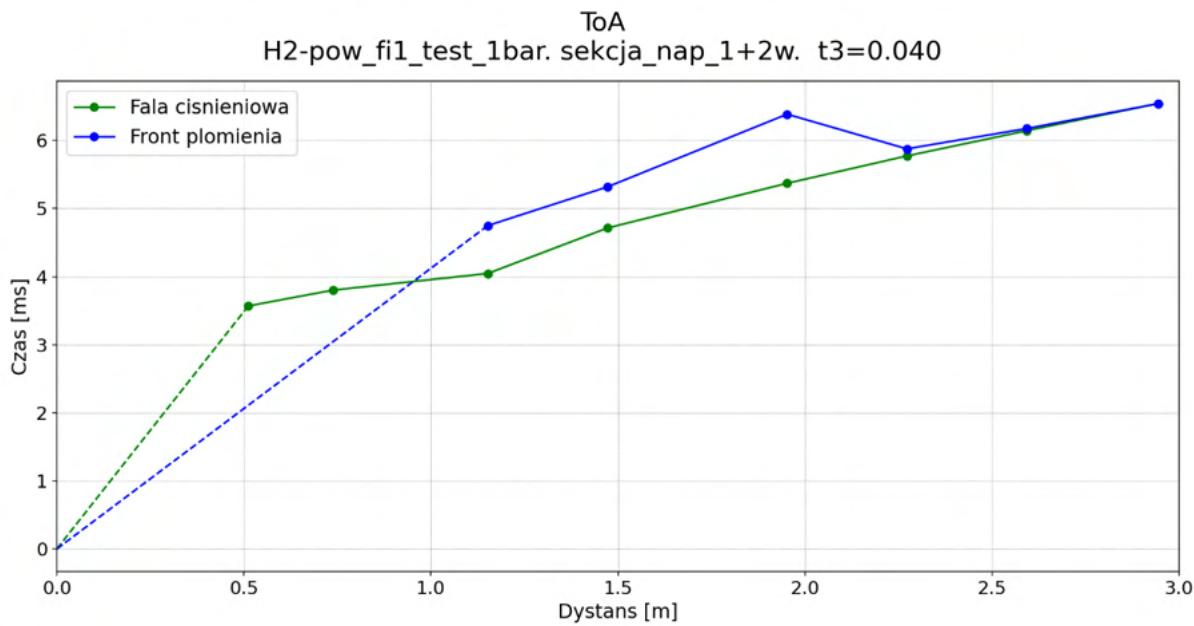
Rysunek 54 Eksperyment 8 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



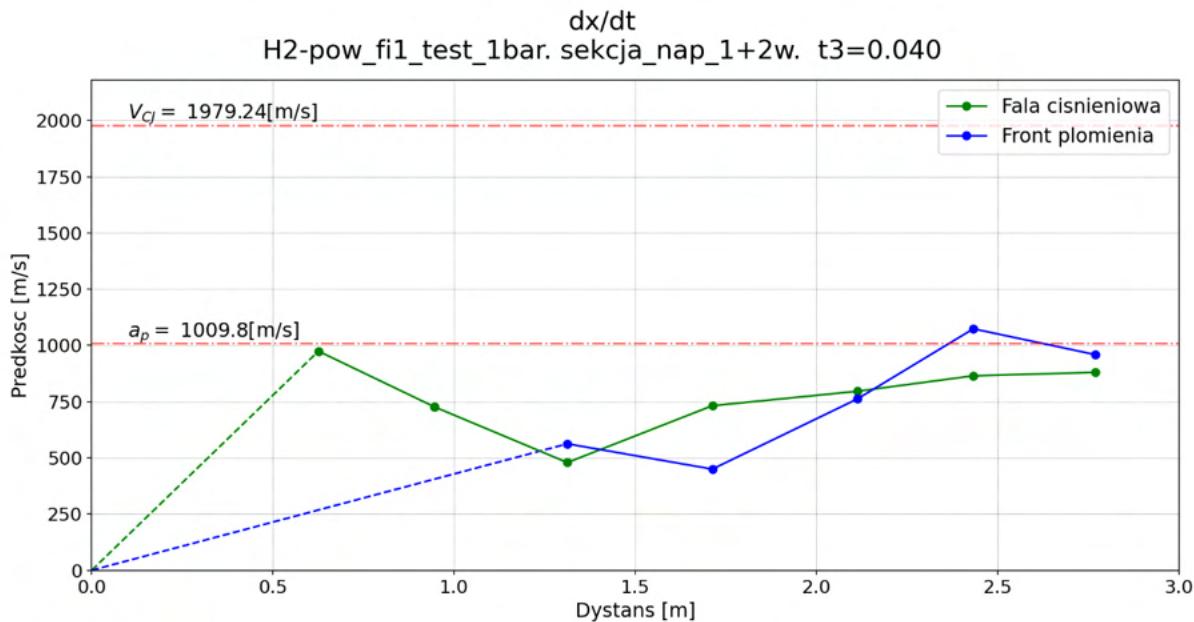
Rysunek 55 Eksperyment 8 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykresy ToA:



Rysunek 56 Eksperyment 8 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

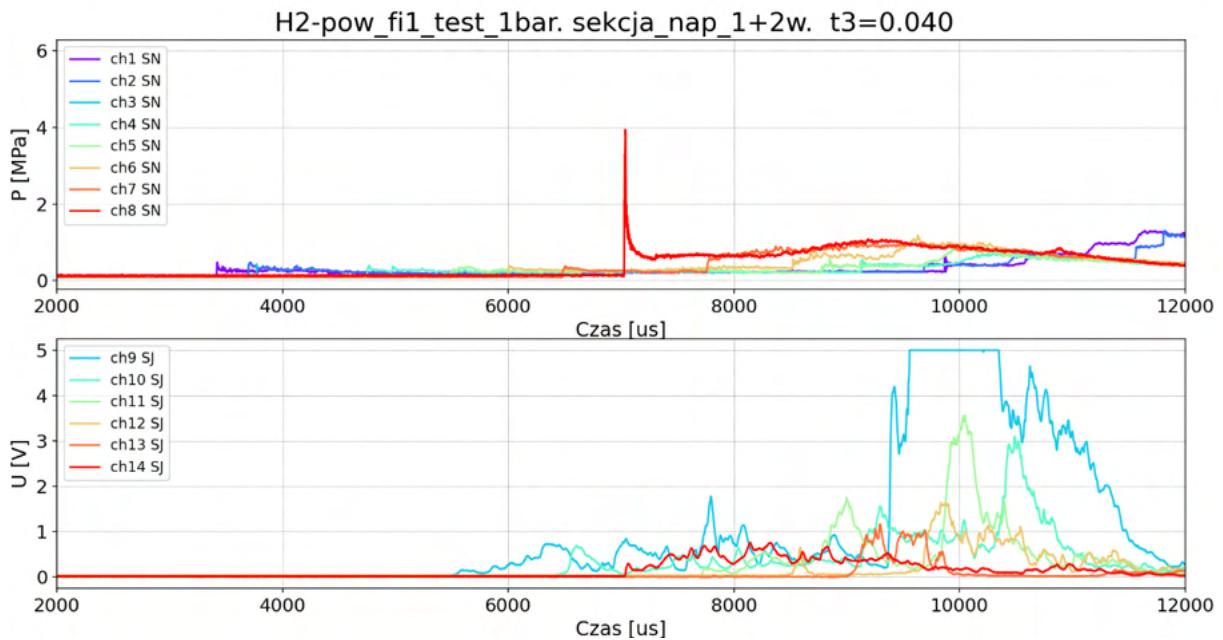


Rysunek 57 Eksperyment 8 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Skokowy wzrost ciśnienia w narożu do wartości 17,2 MPa. Aktywacja ostatniej sondy jonizacyjnej i czujnika ciśnienia w tym samym momencie. Stała w przybliżeniu prędkość fali ciśnieniowej do momentu odbicia w narożu. Po odbiciu powrót fali w przybliżeniu ze stałą, większą prędkością. Zniekształcenie płomienia przy ścianach widoczne na sondach. Nierzeczywisty przebieg fali ciśnieniowej (błąd czujnika nr 3). Charakter prędkości płomienia zmienny na całej długości rury. Detonacja w narożu IDT = 1 us. Prędkość detonacji po odbiciu wynosi 1676,2 m/s.

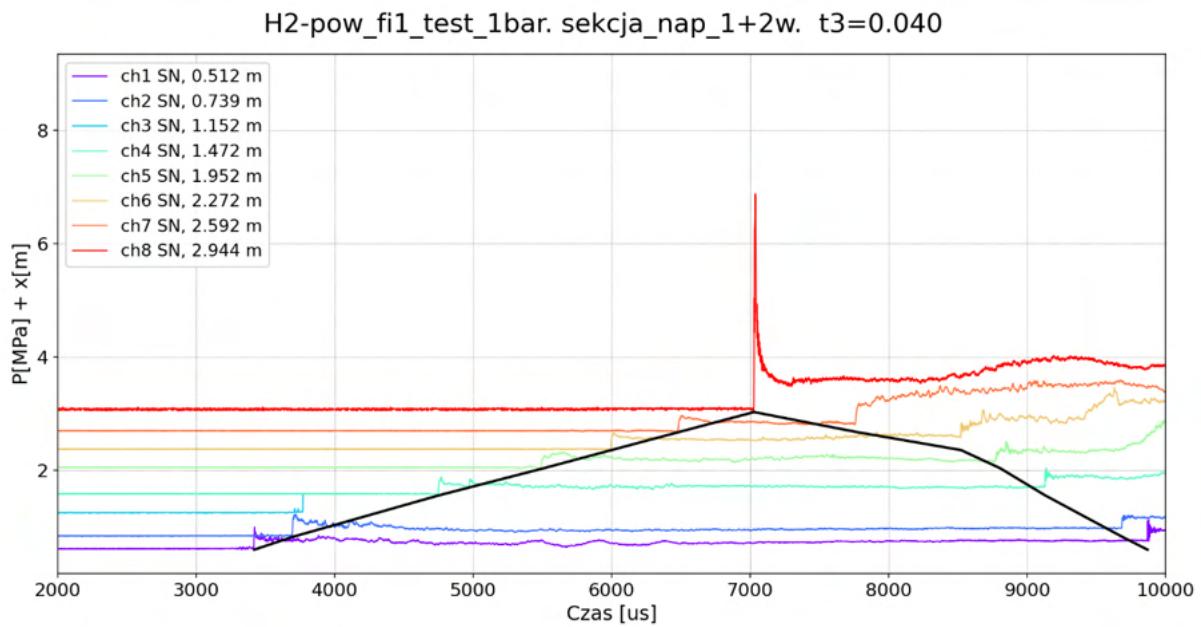
## Eksperyment 9.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



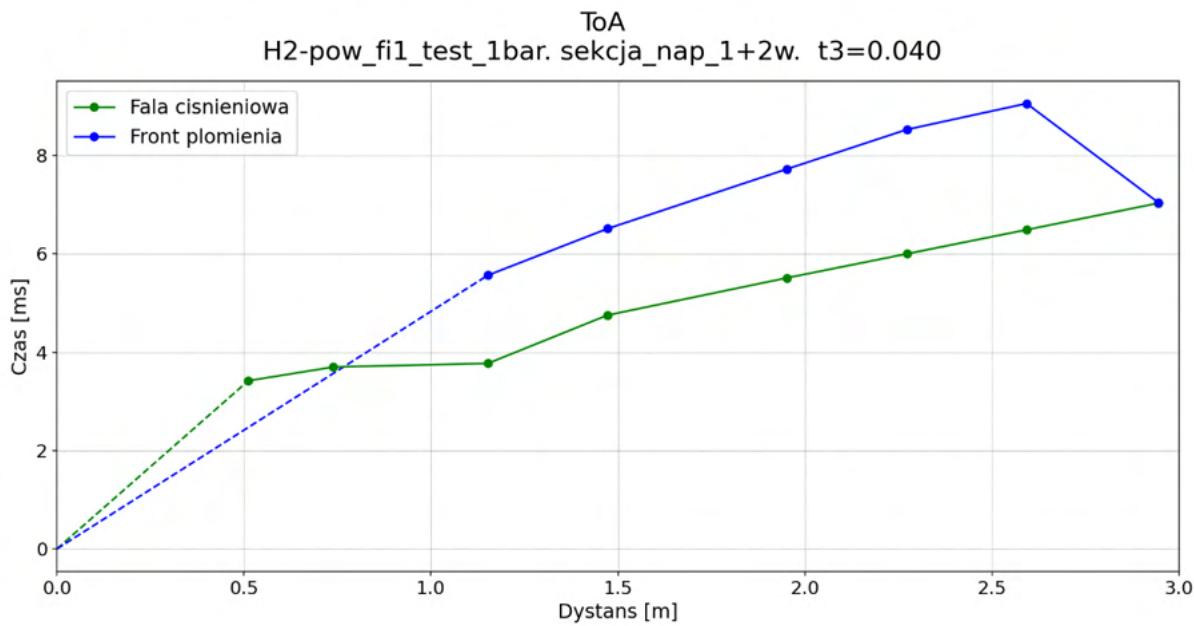
Rysunek 58 Eksperyment 9 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



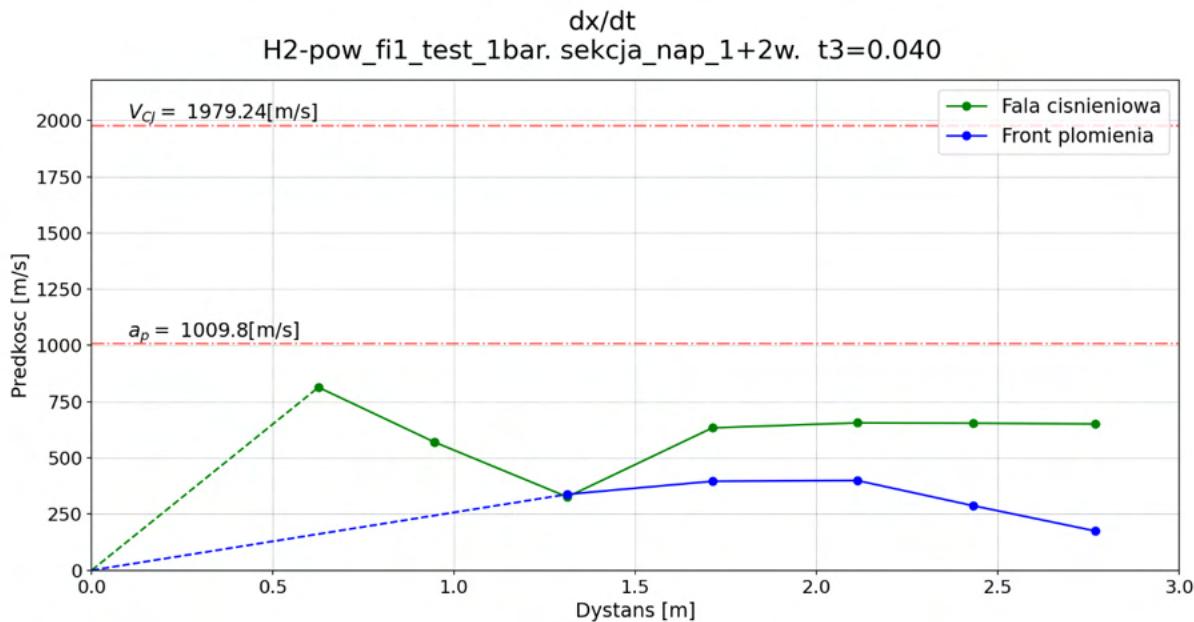
Rysunek 59 Eksperyment 9 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykresy ToA:



Rysunek 60 Eksperyment 9 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

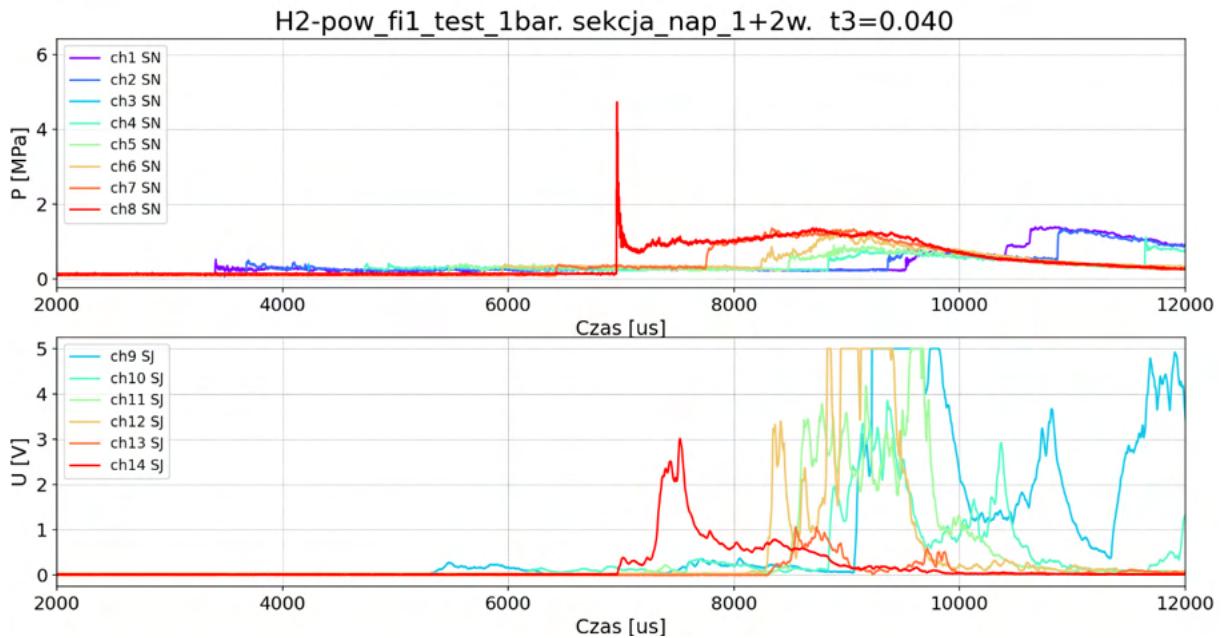


Rysunek 61 Eksperyment 9 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie w narożu 3,9 MPa. Różnica czasowa między aktywacją ostatniej sondy a ostatnim czujnikiem wynosi 12 us. Stała w przybliżeniu prędkość fali ciśnieniowej do chwili odbicia w narożu. Po odbiciu fala zwalnia, a następnie wyraźnie przyspiesza. Zarejestrowano płomień wtórny w narożu. Nierealny przebieg w pierwszej połowie rury dla fali ciśnieniowej, przyjęto, że prędkość w całej sekcji badawczej stała (błędny odczyt czujnika nr 3). Front płomienia lekko przyspiesza do ok. 2,2 m, następnie zwalnia. Opóźniony zapłon w narożu.

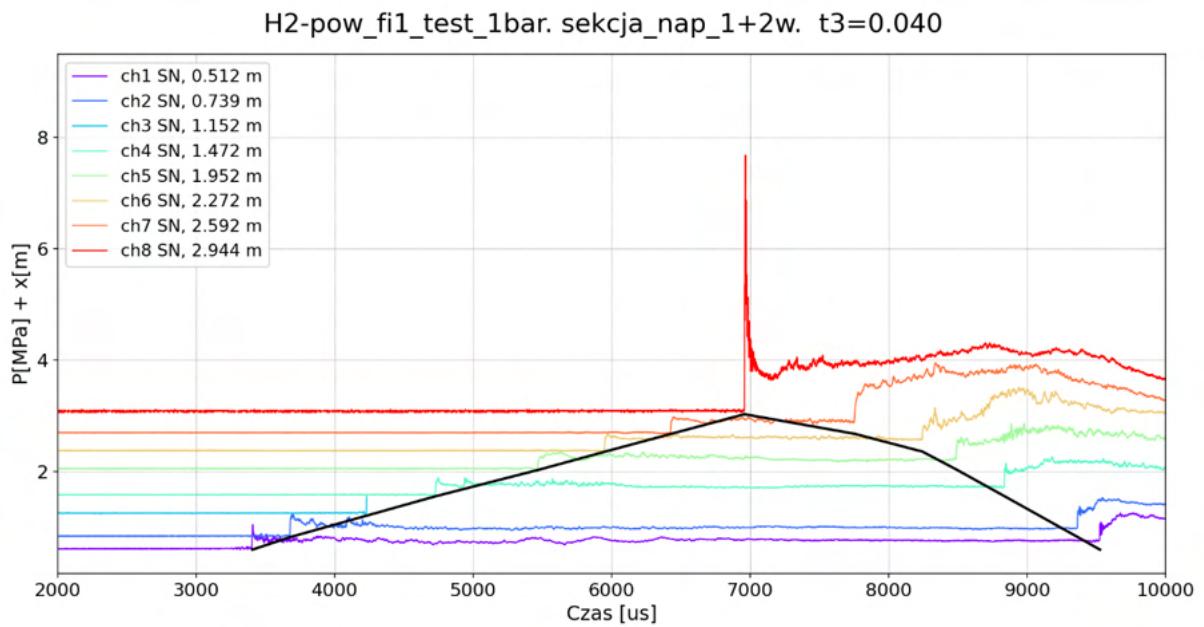
## Eksperyment 10.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



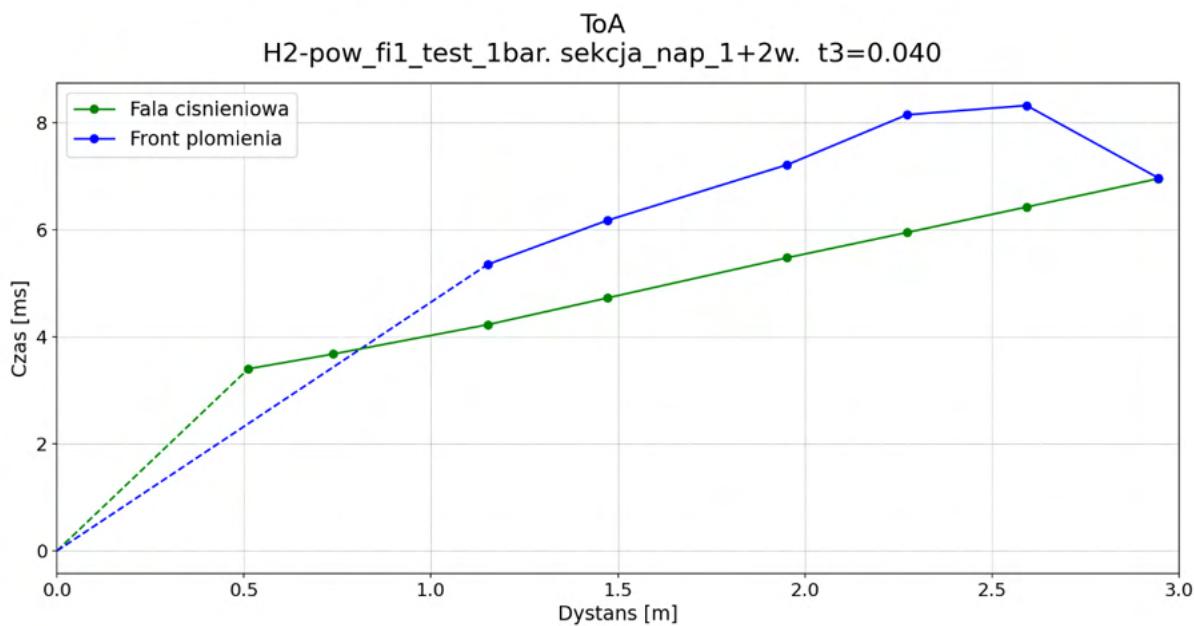
Rysunek 62 Eksperyment 10 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



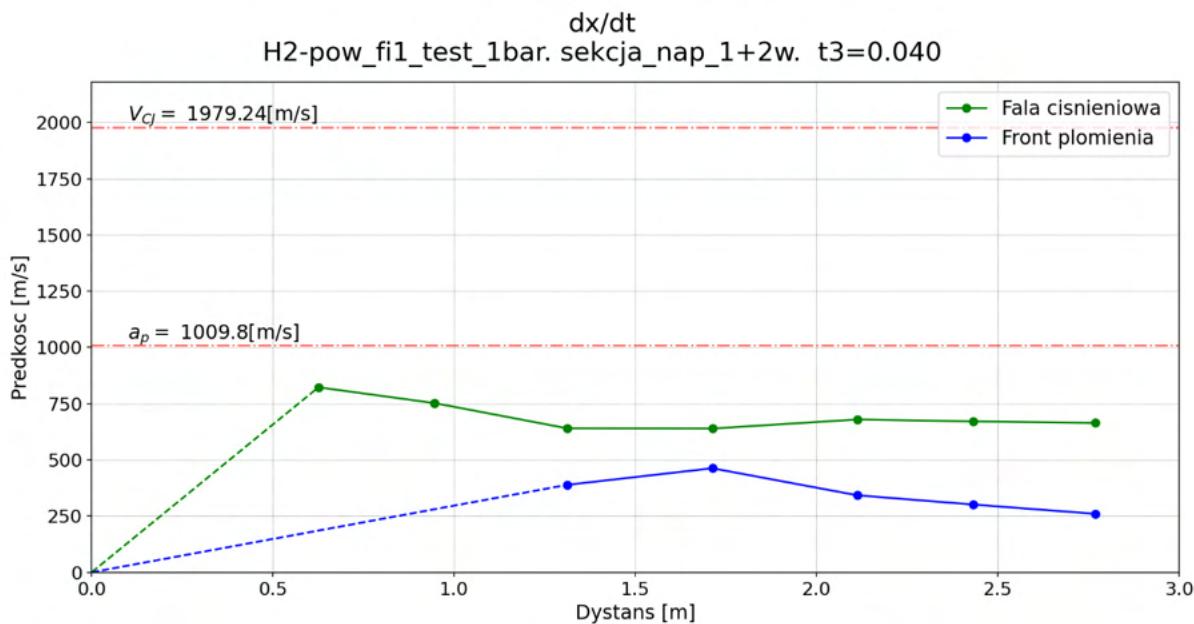
Rysunek 63 Eksperyment 10 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykresy ToA:



Rysunek 64 Eksperyment 10 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

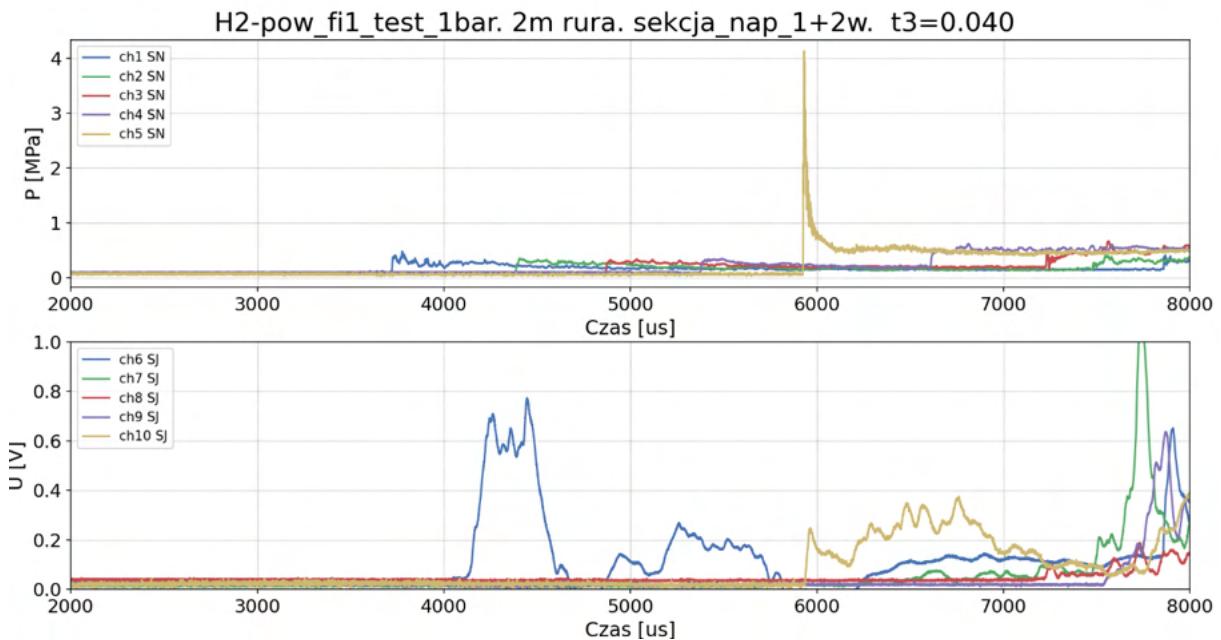


Rysunek 65 Eksperyment 10 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie w narożu 4,7 MPa. Różnica czasowa między aktywacją ostatniej sondy a ostatnim czujnikiem wynosi 13 us. Stała w przybliżeniu prędkość fali ciśnieniowej do chwili odbicia w narożu. Po odbiciu fala zwalnia, a następnie wyraźnie przyspiesza. Zaobserwowano płomień wtórny w narożu. Prędkość frontu płomienia rośnie do ok. 1,7 m wzdłuż rury, następnie maleje. Opóźniony zapłon w narożu.

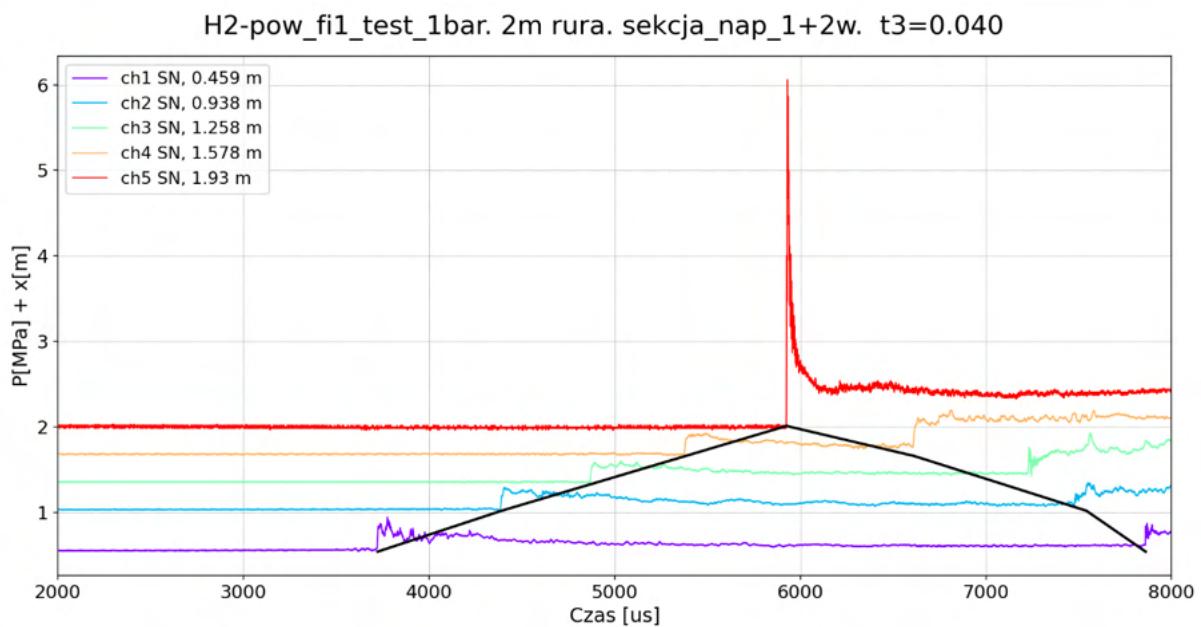
## Eksperyment 11.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



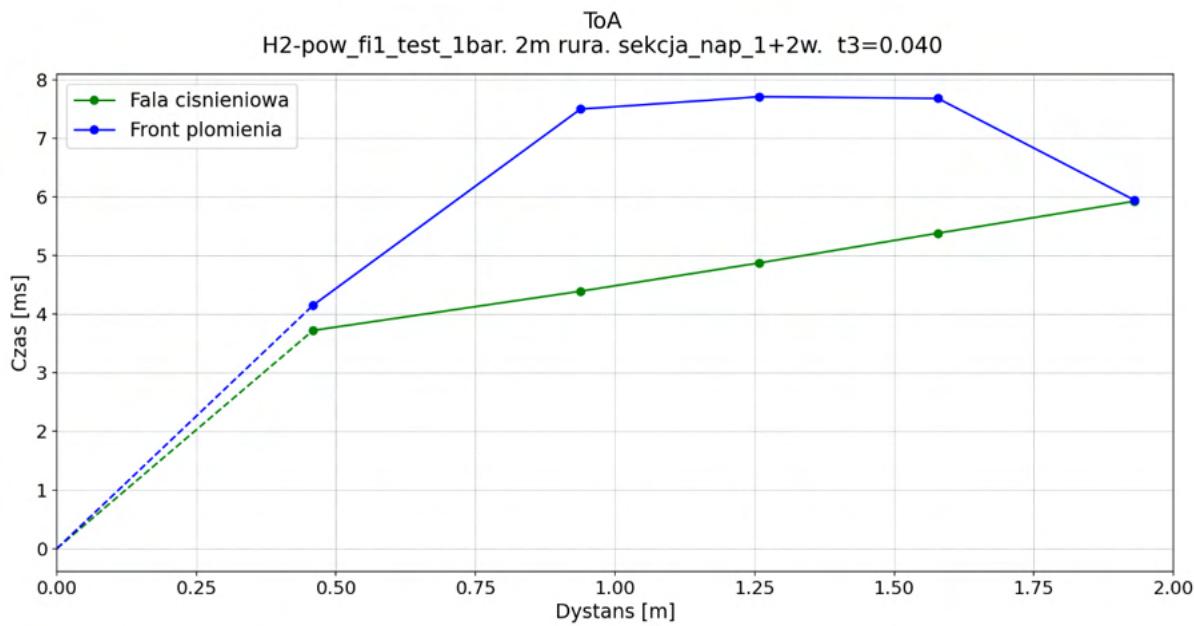
Rysunek 66 Eksperyment 11 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



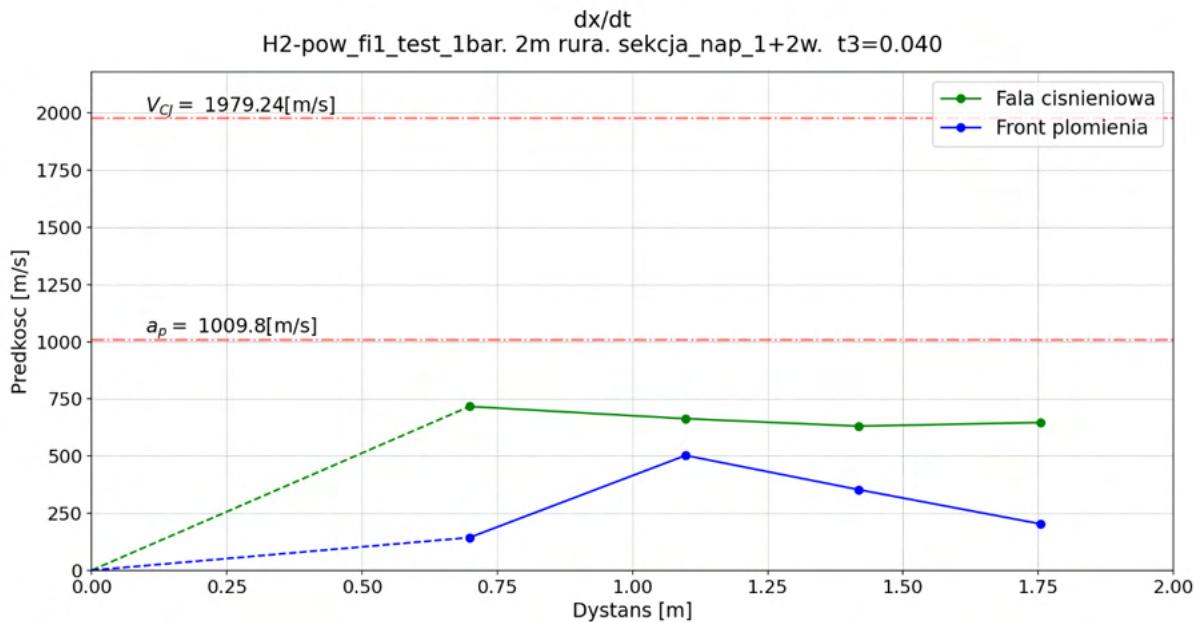
Rysunek 67 Eksperyment 11 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykresy ToA:



Rysunek 68 Eksperyment 11 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

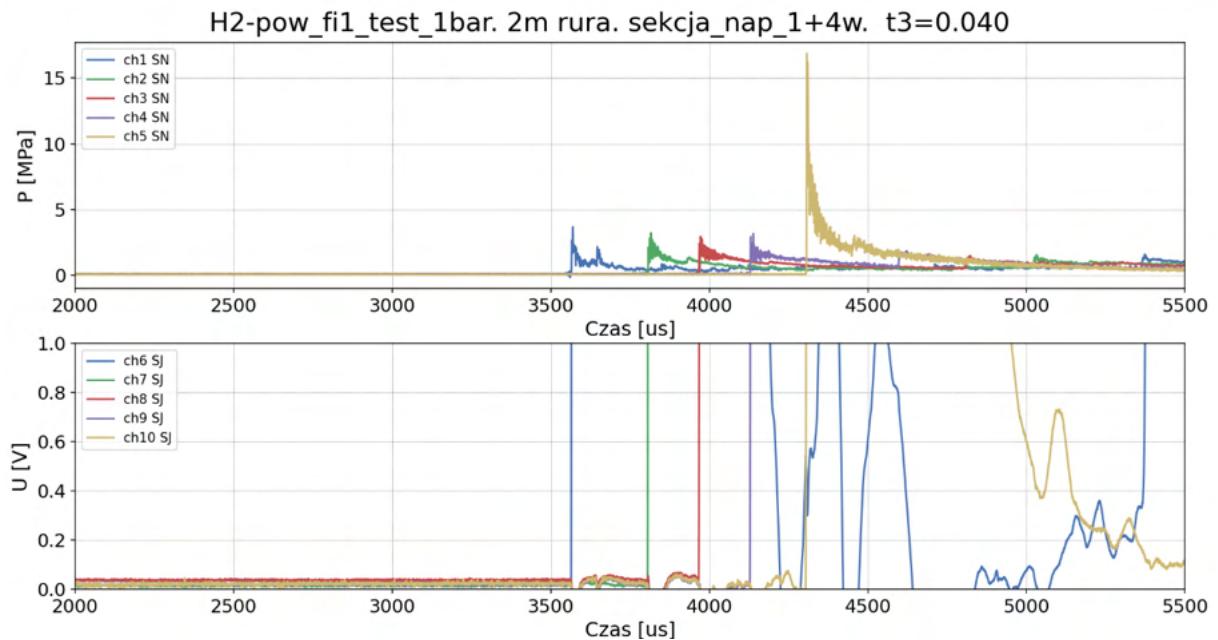


Rysunek 69 Eksperyment 11 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie maksymalne w narożu o wartości 4,14 MPa. Różnica czasowa między aktywacją ostatniej sondy a ostatnim czujnikiem wynosi 20,5 us. Stała w przybliżeniu prędkość fali ciśnieniowej do chwili odbicia w narożu. Po odbiciu fala zwalnia, a następnie przyspiesza. Zarejestrowano zainicjowanie płomienia w narożu. Fala ciśnieniowa w przybliżeniu ze stałą prędkością. Prędkość frontu płomienia rośnie, następnie maleje. Opóźniony zapłon w narożu.

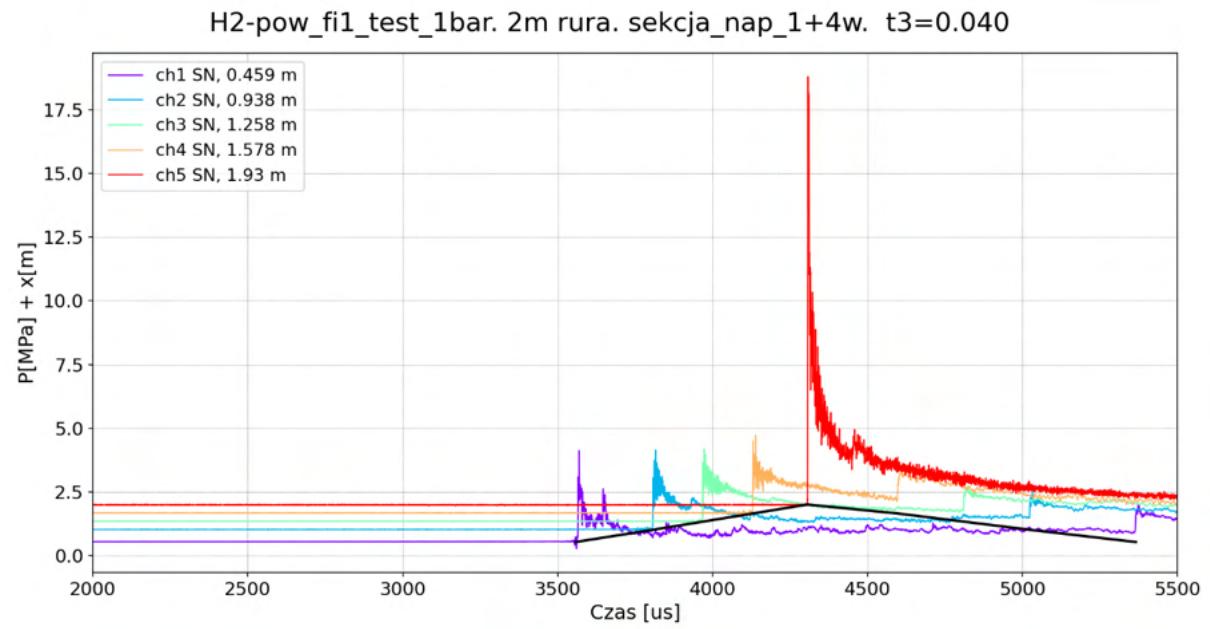
## Eksperyment 12.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



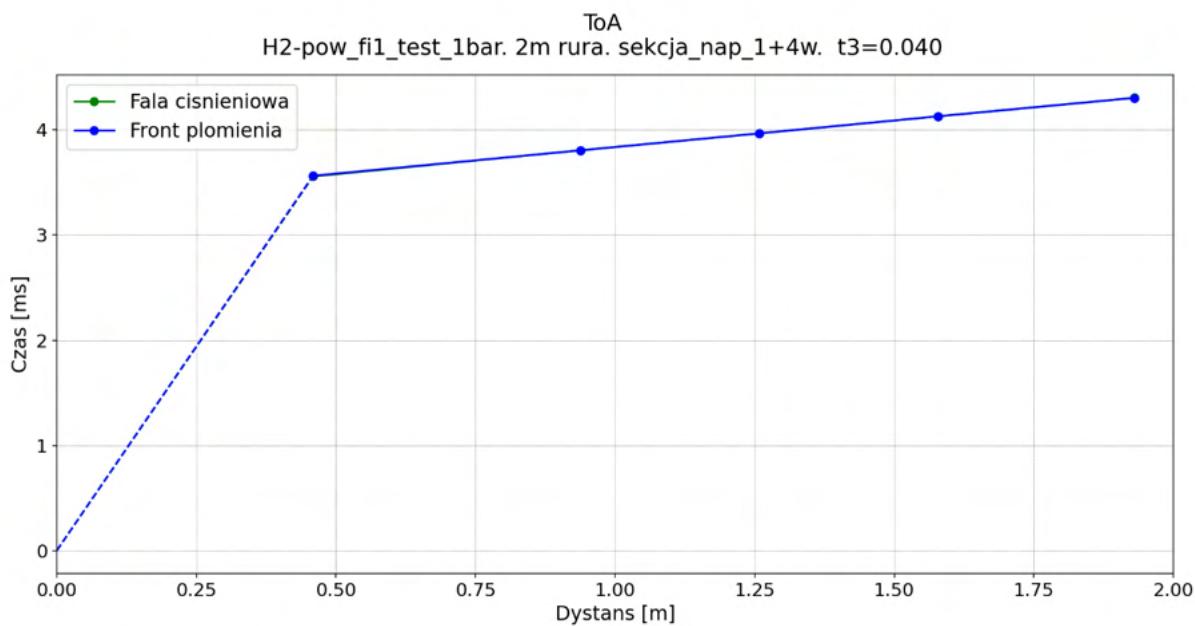
Rysunek 70 Eksperyment 12 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



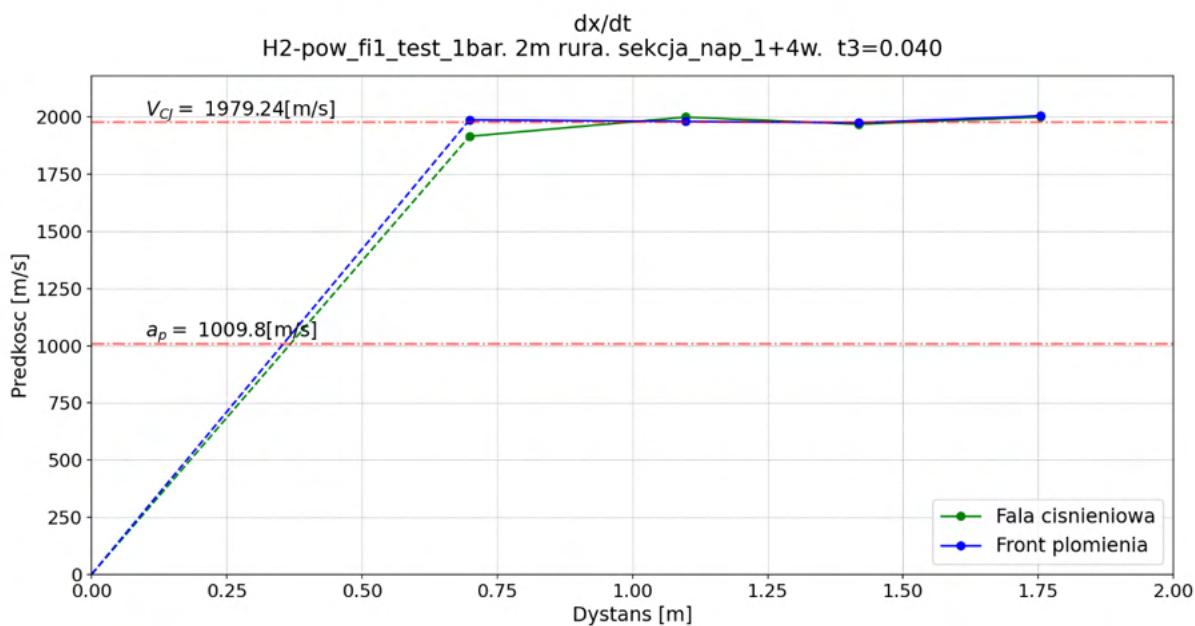
Rysunek 71 Eksperyment 12 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykresy ToA:



Rysunek 72 Eksperyment 12 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia.

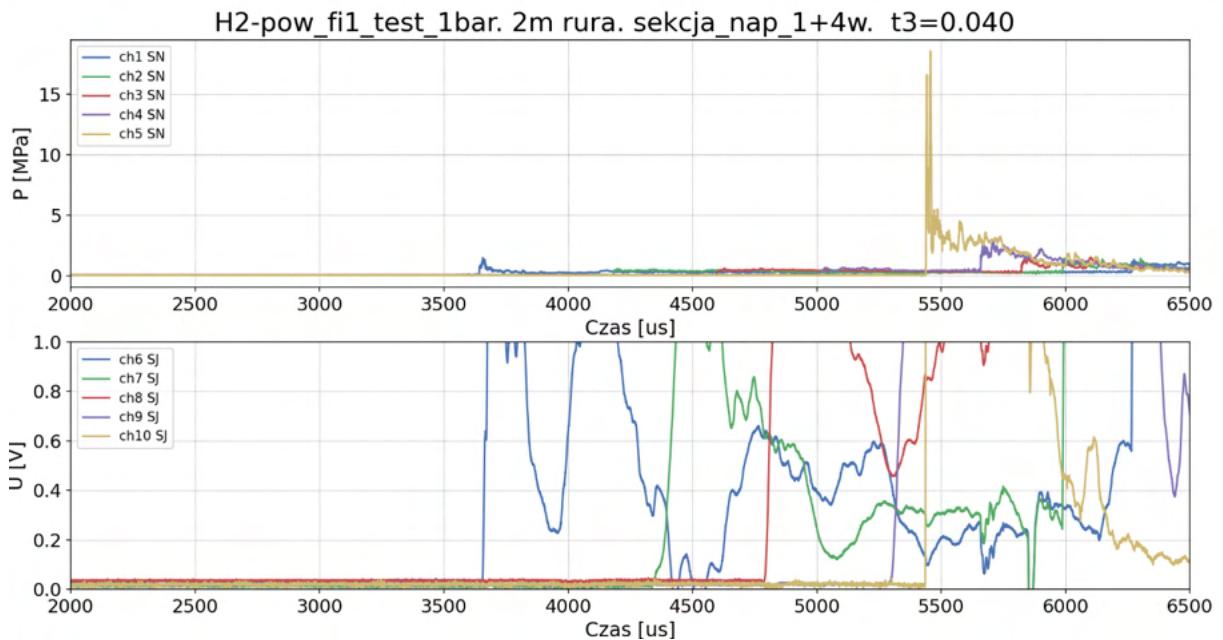


Rysunek 73 Eksperyment 12 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie maksymalne w narożu 16,8 MPa. Wyraźnie wyższe pomiary na wszystkich czujnikach. Stała prędkość płomienia i fali ciśnieniowej w całej sekcji badawczej (w przybliżeniu prędkość CJ). Przedwczesna detonacja. Prędkość detonacji w chwili uderzenia w naroże równa około 1980 m/s.

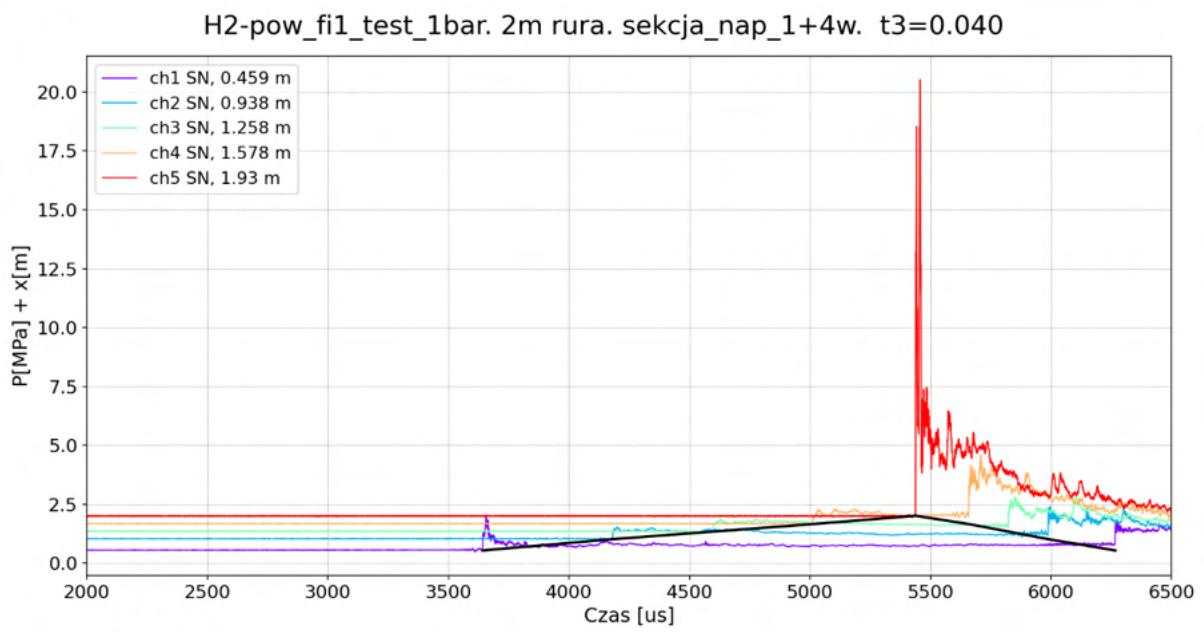
## Eksperyment 13.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



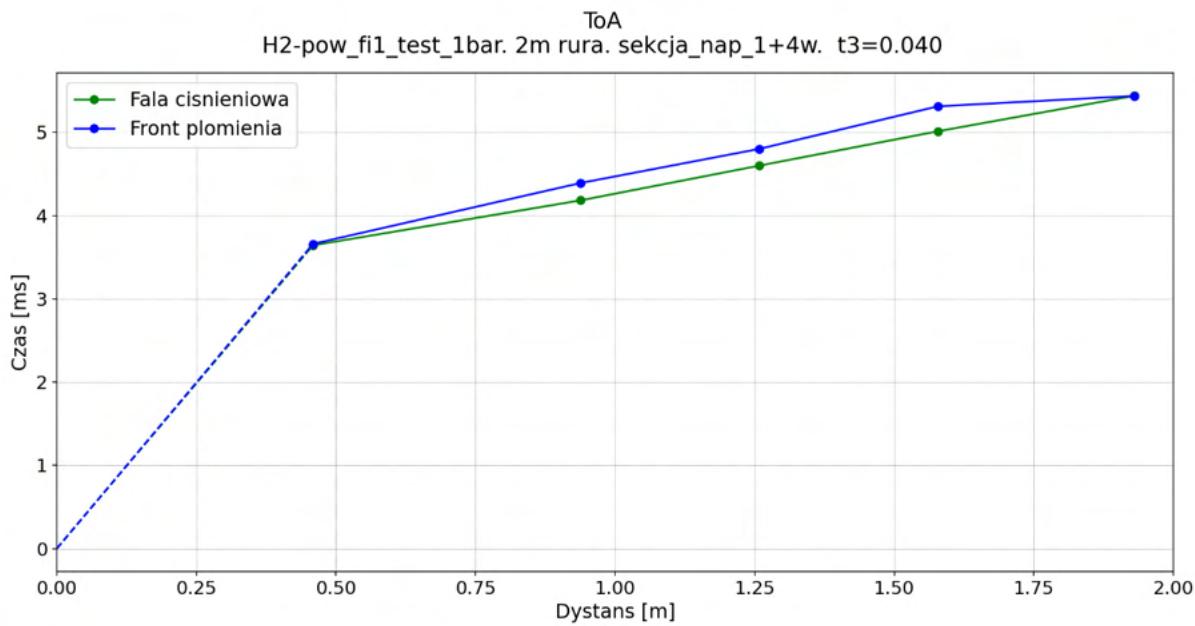
Rysunek 74 Eksperyment 13 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



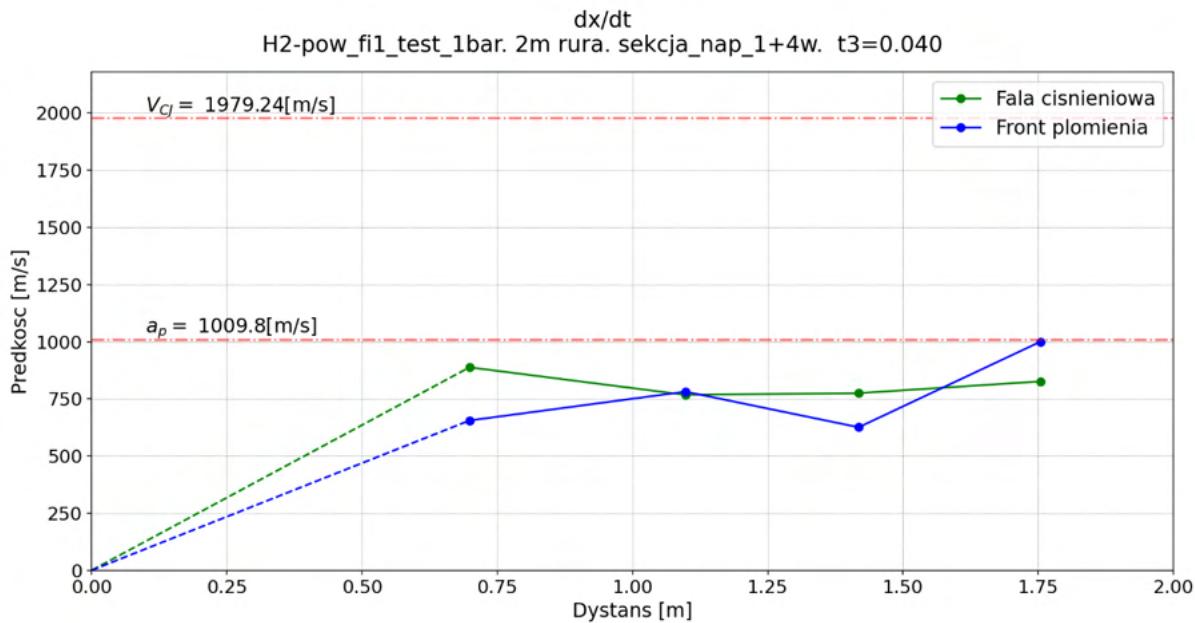
Rysunek 75 Eksperyment 13 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykresy ToA:



Rysunek 76 Eksperyment 13 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

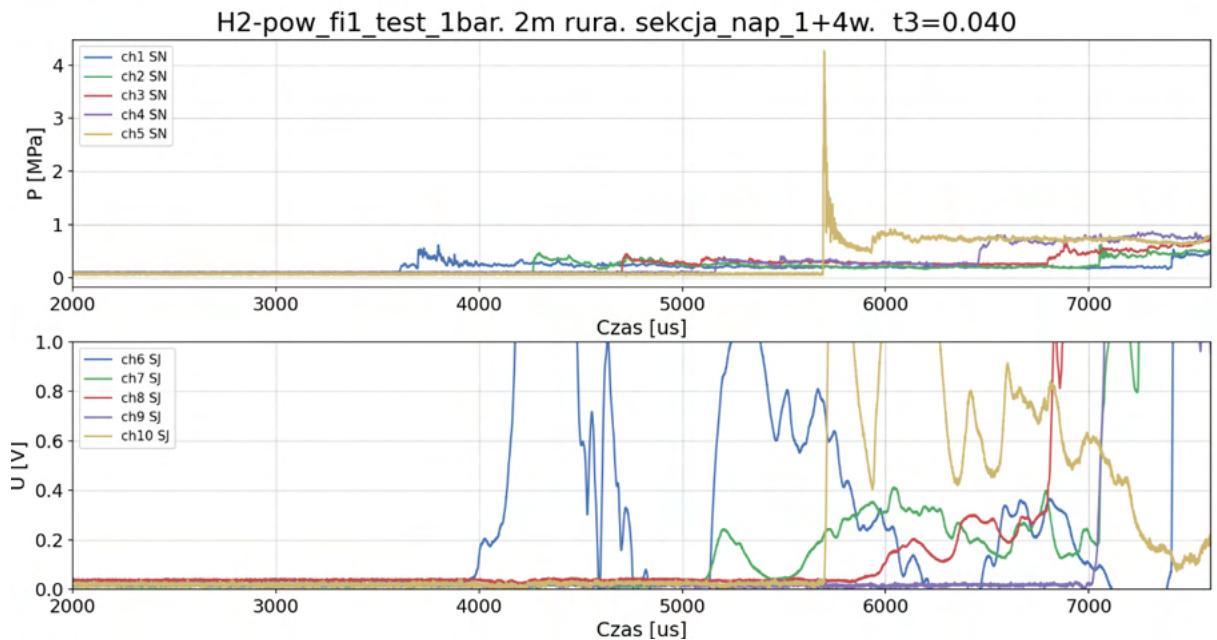


Rysunek 77 Eksperyment 13 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Maksymalne ciśnienie w narożu o wartości 18,5 MPa. W przybliżeniu stała prędkość fali ciśnieniowej, fala po odbiciu wraca z większą, w przybliżeniu stałą prędkością. Na wykresie ToA prędkości płomienia i fali zbliżone, płomień goni falę ciśnieniową. Detonacja w narożu. Prędkość detonacji po odbiciu wynosi 1592,8 m/s.

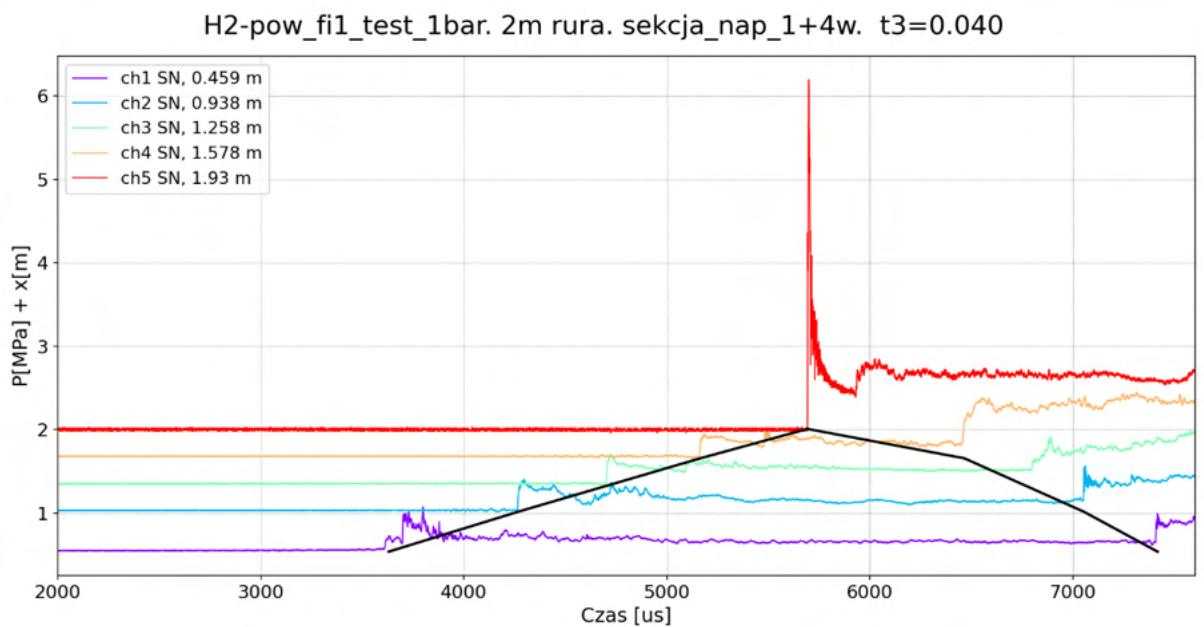
## Eksperyment 14.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



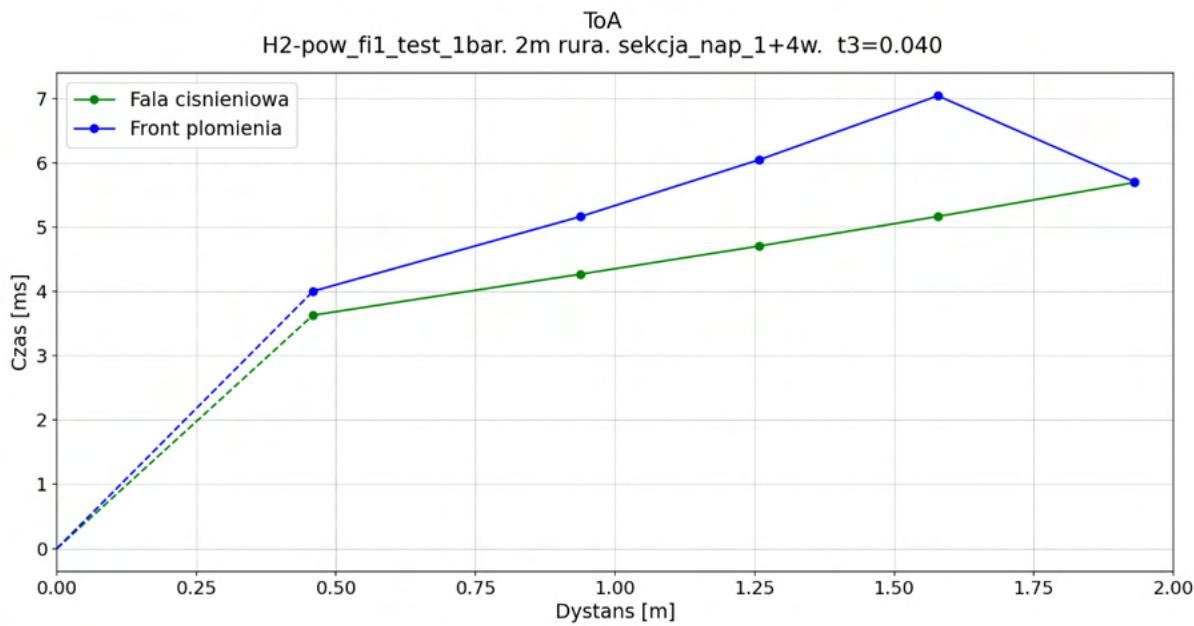
Rysunek 78 Eksperyment 14 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



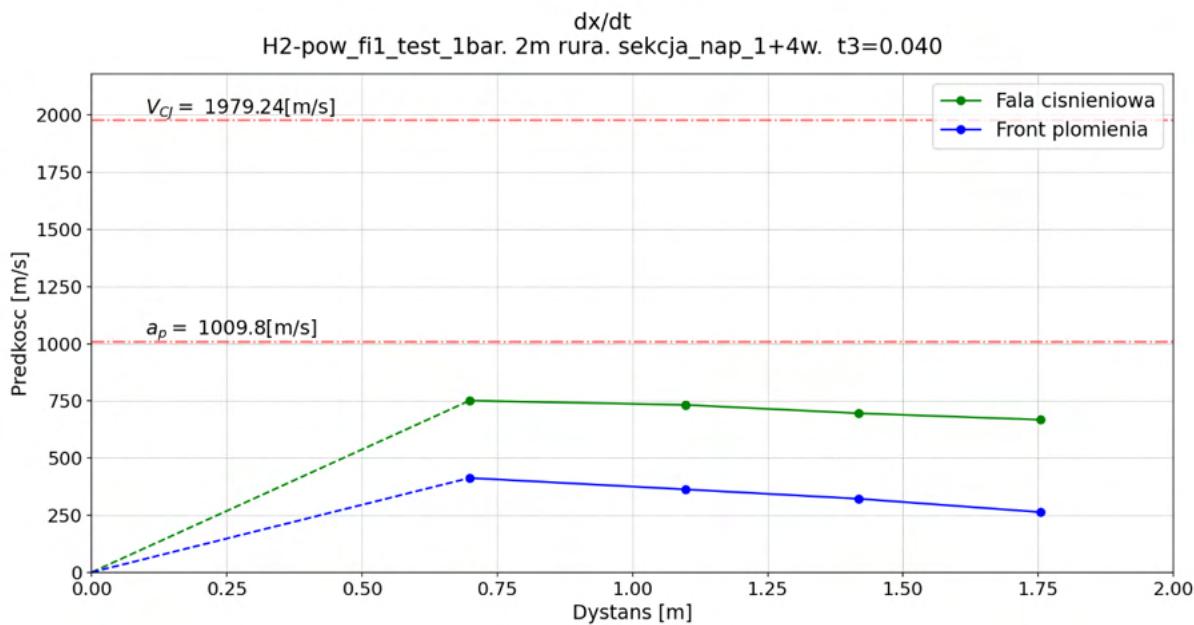
Rysunek 79 Eksperyment 14 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykresy ToA:



Rysunek 80 Eksperyment 14 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:



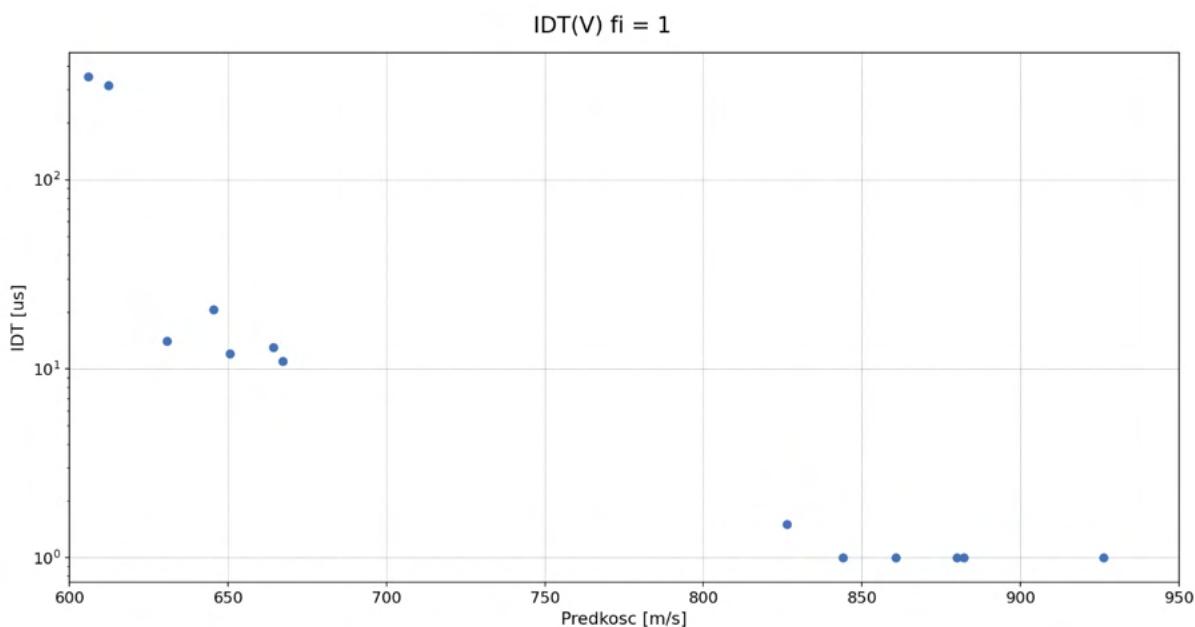
Rysunek 81 Eksperyment 14 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Maksymalne ciśnienie w narożu o wartości 4,2 MPa. Różnica w aktywacji ostatniego czujnika i sondy 11 us. W przybliżeniu stała prędkość fali ciśnieniowej, po odbiciu fala przyspiesza wraz z odległością. Zaobserwowano płomień wtórny w narożu. Opóźniony zapłon w narożu.

Tabela 4 zestawienie wyników eksperymentów mieszaniny  $\phi = 1$ 

Nr eksperymentu	Prędkość fali w chwili uderzenia w naroże [m/s]	Czas opóźnienia zapłonu [us]	Czy doszło do detonacji	Czy zaszła deflagracja	Ciśnienie w narożu w momencie uderzenia fali [MPa]
1	926,3	1	tak (w narożu)	nie	poza zakres (>6,7 MPa)
2	882,2	1	tak (w narożu)	nie	poza zakres (>6,7 MPa)
3	612,2	314	nie	tak	2,5
4	605,9	350	nie	tak	2,37
5	630,8	14	nie	tak	3,2
6	860,6	1	tak (w narożu)	nie	poza zakres (>33,3 MPa)
7	844,1	1	tak (w narożu)	nie	18,3
8	880	1	tak (w narożu)	nie	17,2
9	650,6	12	nie	tak	3,9
10	664,2	13	nie	tak	4,7
11	645,5	20,5	nie	tak	4,13
12	1980	1	tak (przedwczesna)	nie	16,8
13	826,3	1,5	tak (w narożu)	nie	18,5
14	667,3	11	nie	tak	4,2

Po przeprowadzeniu 14 eksperymentów dla mieszaniny stechiometrycznej (29,6% wodoru) można wyciągnąć następujące wnioski. Minimalna zarejestrowana prędkość, dla której zaobserwowano przejście do detonacji w narożu była równa 826 m/s dla eksperymentu nr 13. Rejestrowane ciśnienia są w zakresie od 2,5 do 33,3 MPa (maksymalny zakres czujnika). Poniżej prędkości około 630 m/s nie dochodzi do zapłonu w narożu. Opóźniony zapłon z deflagracją zarejestrowany dla maksymalnej prędkości fali równej 667 m/s (eksperyment nr 14).



Rysunek 82 wykres opóźnienia zapłonu w zależności od prędkości fali ciśnieniowej

Na podstawie wykresu można wyróżnić trzy kategorie punktów. Pierwsza grupa dla IDT o wartościach 1 - 2 us (prędkość fali ciśnieniowej powyżej 800 m/s), dla kolejnej grupy punktów IDT w zakresie 10-30 us (prędkość fali ciśnieniowej w zakresie 630-700 m/s), ostatnia grupa powyżej 300 us (prędkości fali ciśnieniowej poniżej 630 m/s).

## 5.2 Badanie mieszaniny o współczynniku ekwiwalencji $\Phi = 1,6$

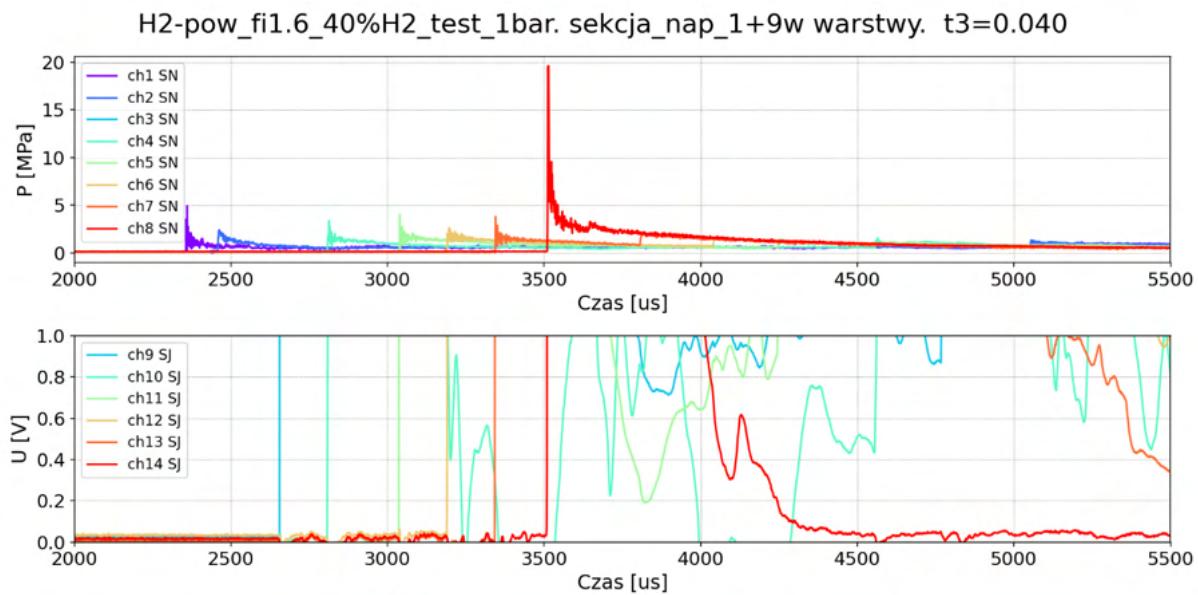
Kolejny zestaw badań dotyczących mieszaniny wodorowo-powietrznej o stężeniu wodoru równym 40% ( $\phi = 1,6$ ). Przeprowadzono 16 prób w zróżnicowanych konfiguracjach sekcji badawczej (tabela 5). Otrzymane wyniki i ich opisy przedstawiono poniżej.

Tabela 5 konfiguracje sekcji napędzającej mieszaniny  $\phi = 1,6$

Konfiguracja 1 stanowiska badawczego	
Eksperyment 1	1 człon sekcji + 9 warstw
Eksperyment 2	1 człon sekcji
Eksperyment 3	1 człon sekcji + 2 warstwy
Eksperyment 4	1 człon sekcji + 4 warstwy
Konfiguracja 2 stanowiska badawczego	
Eksperyment 5	1 człon sekcji + 2 warstwy
Eksperyment 6	1 człon sekcji + 4 warstwy
Eksperyment 7	1 człon sekcji + 4,5 warstwy
Eksperyment 8	1 człon sekcji + 4,5 warstwy
Eksperyment 9	1 człon sekcji + 4,5 warstwy
Eksperyment 10	1 człon sekcji + 4,5 warstwy
Eksperyment 11	1 człon sekcji + 4,5 warstwy
Eksperyment 12	1 człon sekcji + 4,5 warstwy
Eksperyment 13	1 człon sekcji + 4,5 warstwy
Eksperyment 14	1 człon sekcji + 6,5 warstwy
Eksperyment 15	1 człon sekcji + 6,5 warstwy
Eksperyment 16	1 człon sekcji + 6,5 warstwy

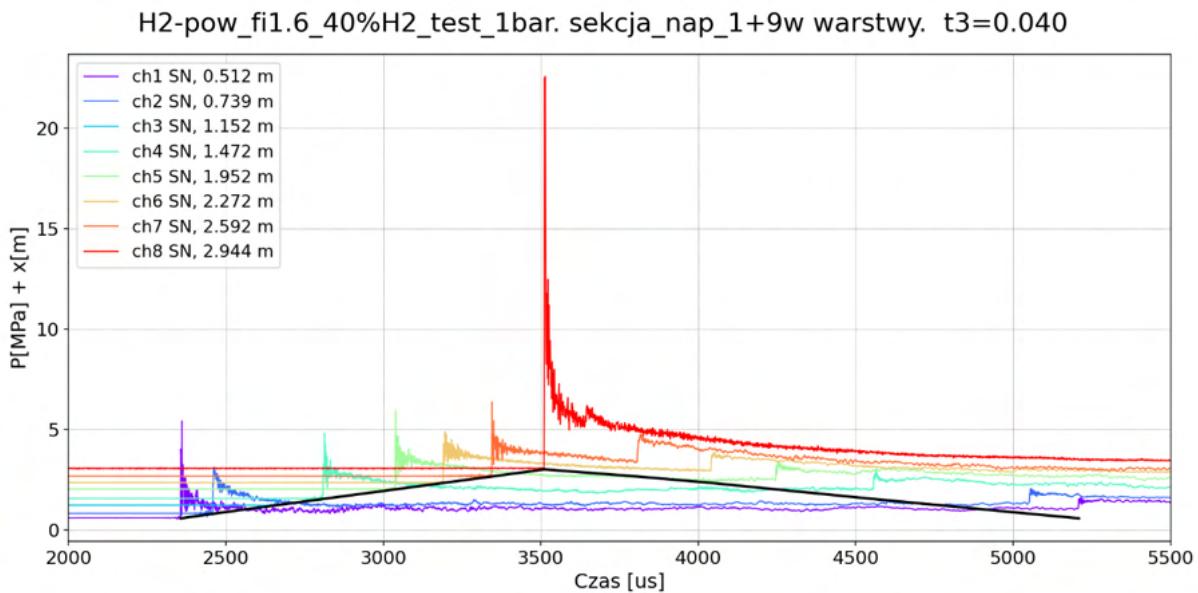
## Eksperyment 1.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



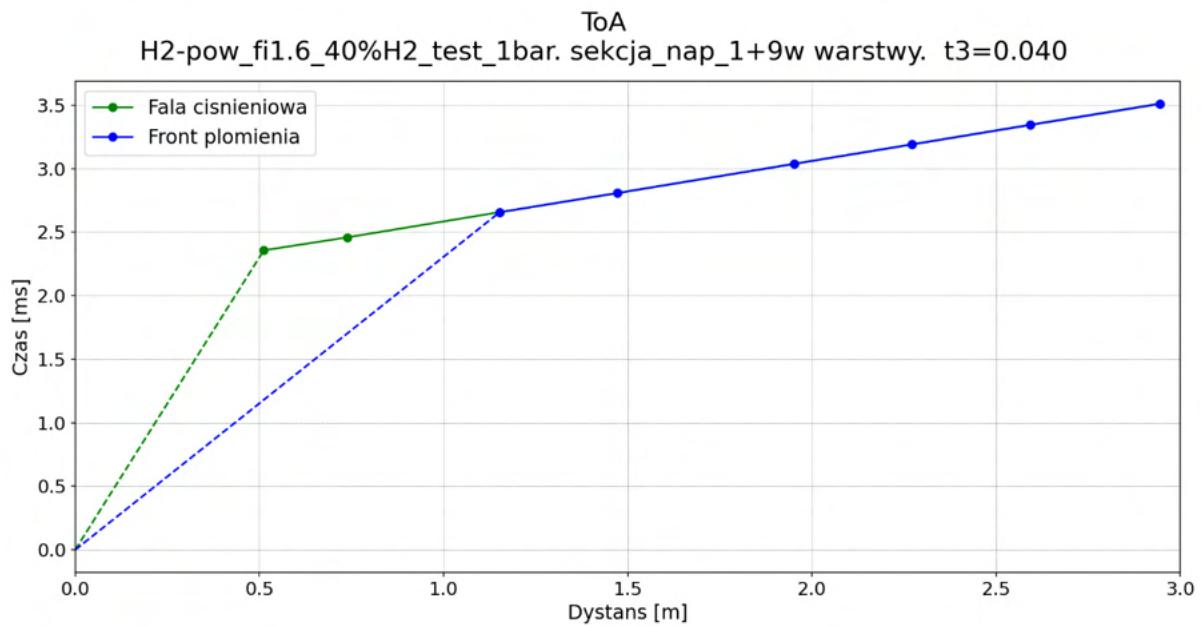
Rysunek 83 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1, 6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



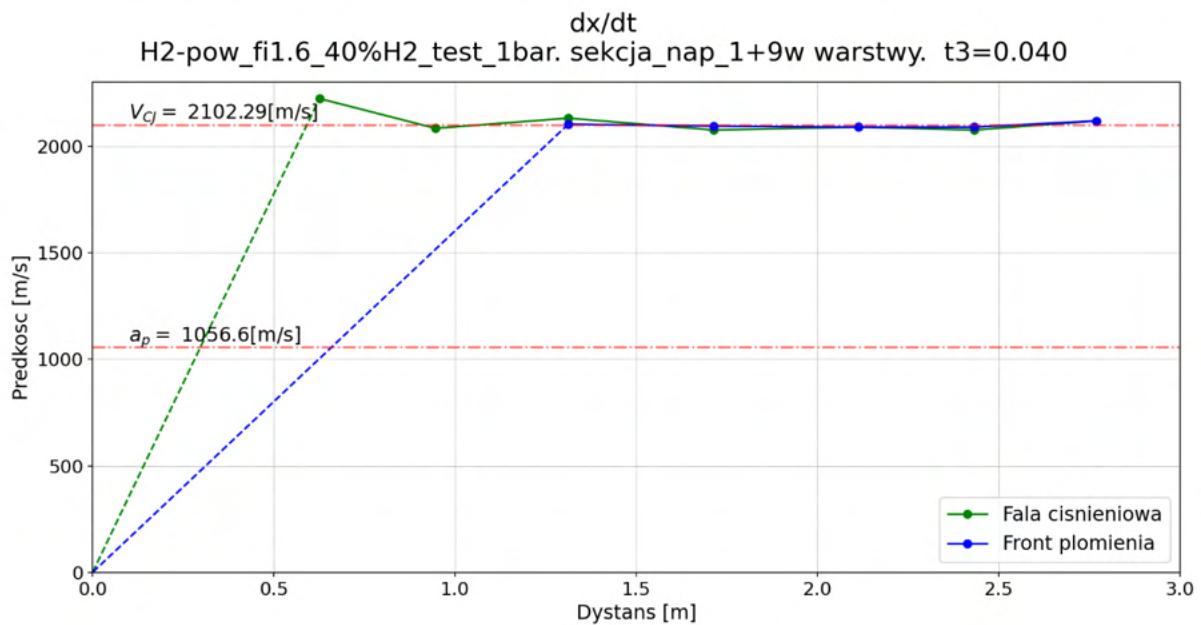
Rysunek 84 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1, 6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 85 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

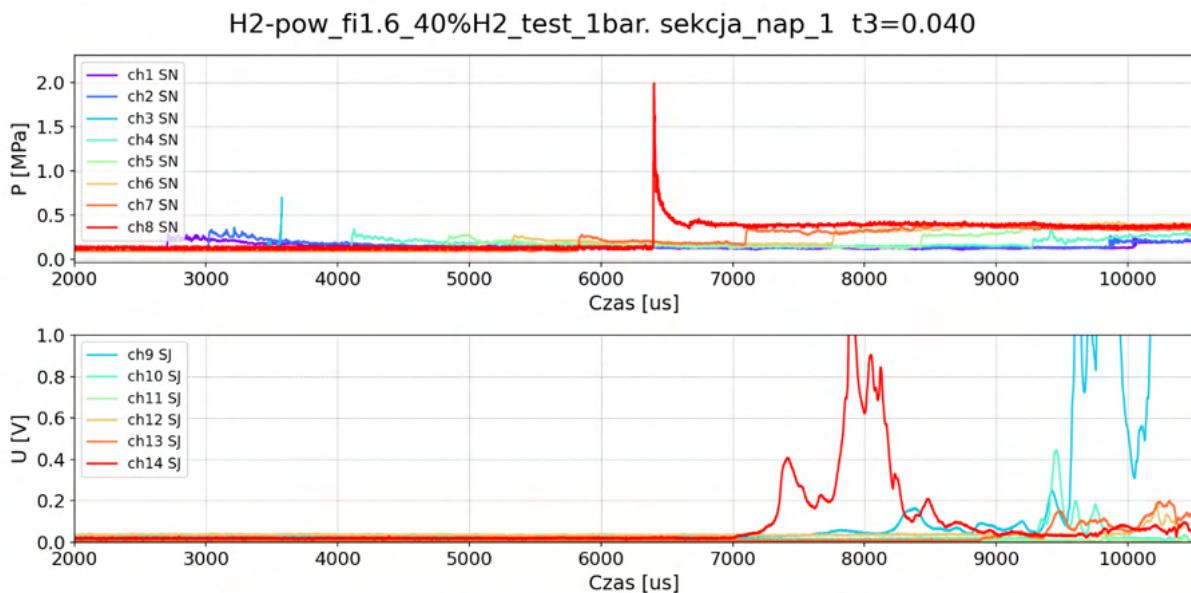


Rysunek 86 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie maksymalne zarejestrowane na pierwszym czujniku o wartości 19,6 MPa. Zarejestrowana detonacja w sekcji badawczej, prędkość detonacji w przybliżeniu stała i wynosząca w chwili uderzenia w naroże 2120,5 m/s. Przedwczesne przejście do detonacji.

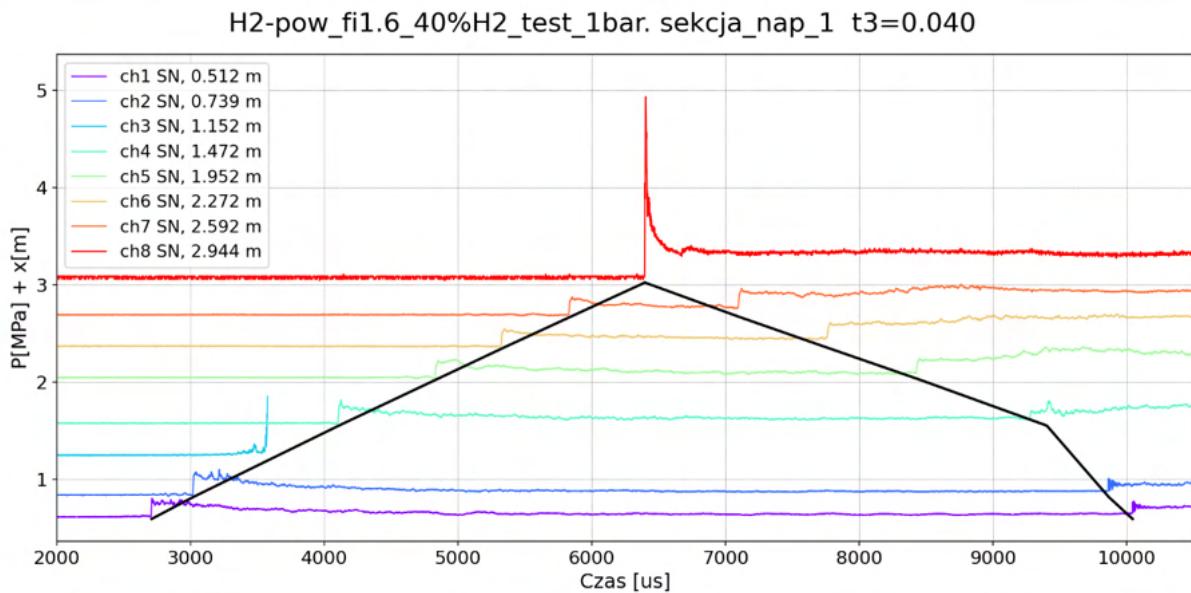
## Eksperyment 2.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



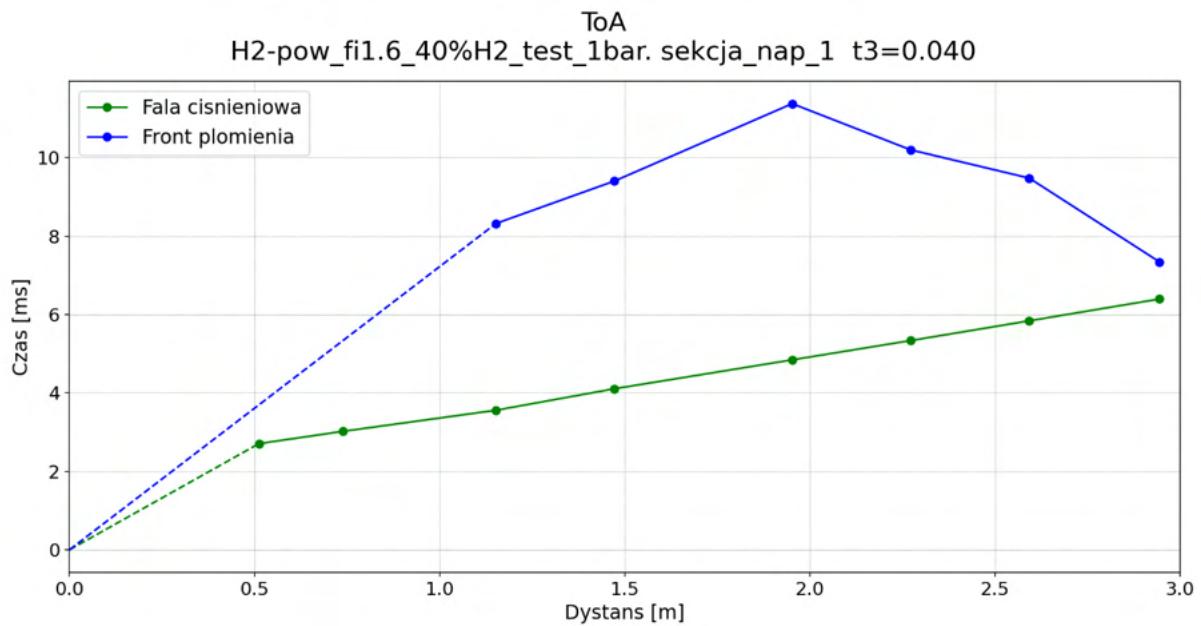
Rysunek 87 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1, 6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



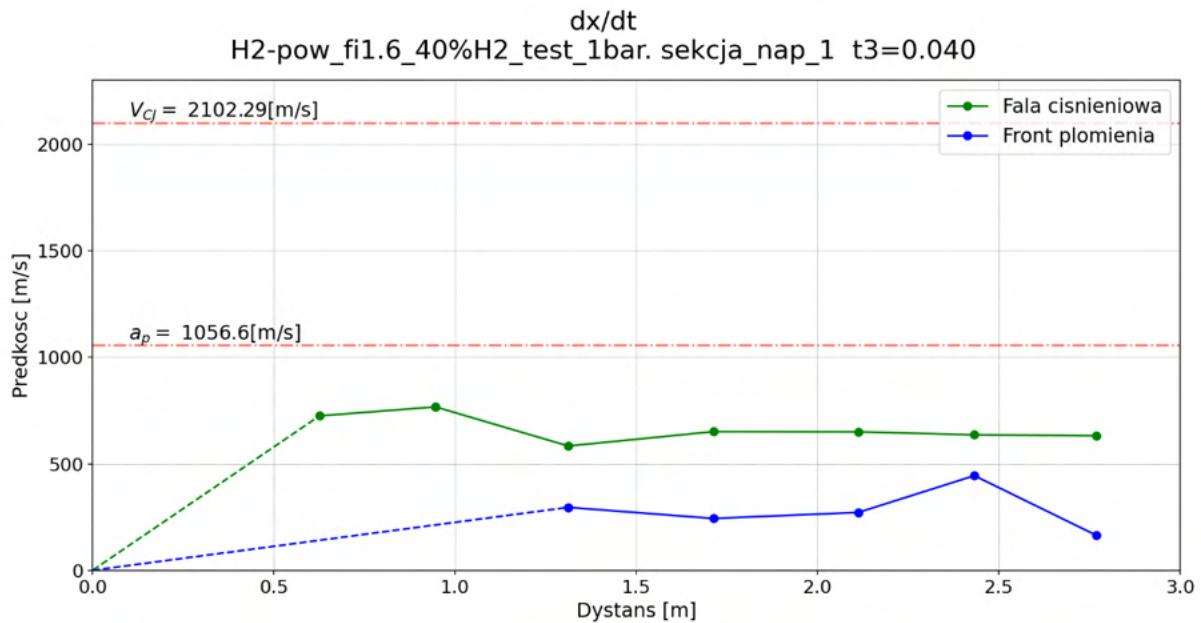
Rysunek 88 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1, 6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 89 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

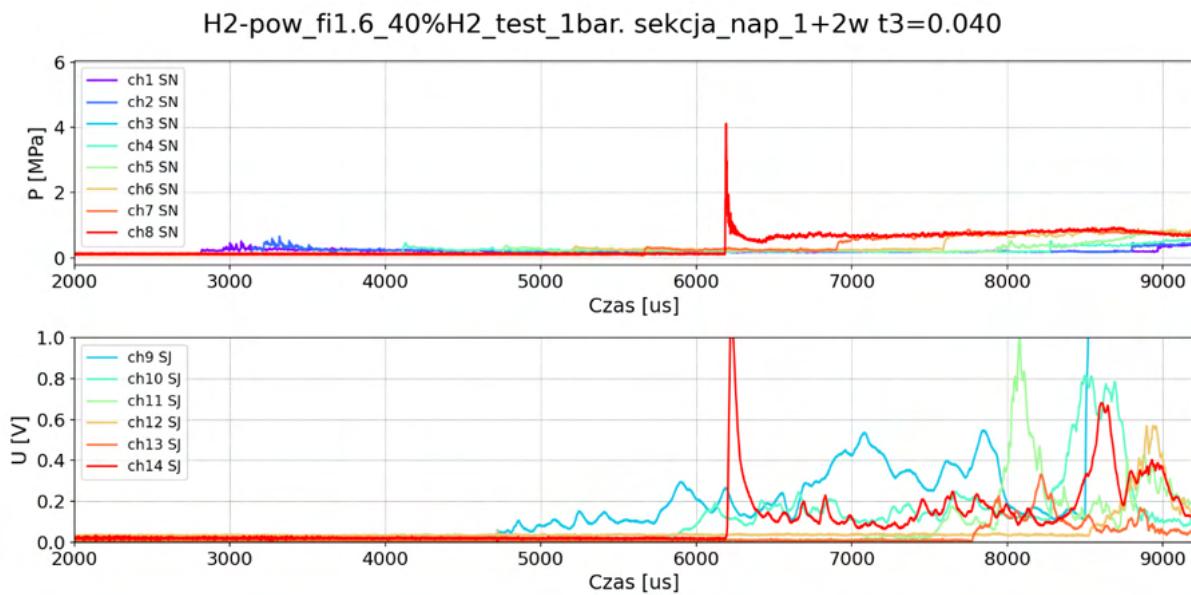


Rysunek 90 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Maksymalne ciśnienie na ostatnim czujniku w narożu o wartości 2,0 MPa, błędny odczyt czujnika nr 3. W przybliżeniu stała prędkość propagacji fali ciśnieniowej, po odbiciu fala wraca z większą prędkością wyraźnie przyspieszając w okolicy 1,5 m długości rury. Zaobserwowano powstały płomień w narożu, który propaguje w kierunku sekcji napędzającej. Front płomienia początkowo propaguje w przybliżeniu ze stałą prędkością, w ok. 2,2 m długości rury przyspiesza, a od 2,45 m maleje. Prędkość fali w chwili uderzenia w naroże o wartości 632 m/s. Opóźniony zapłon w narożu IDT = 945 us.

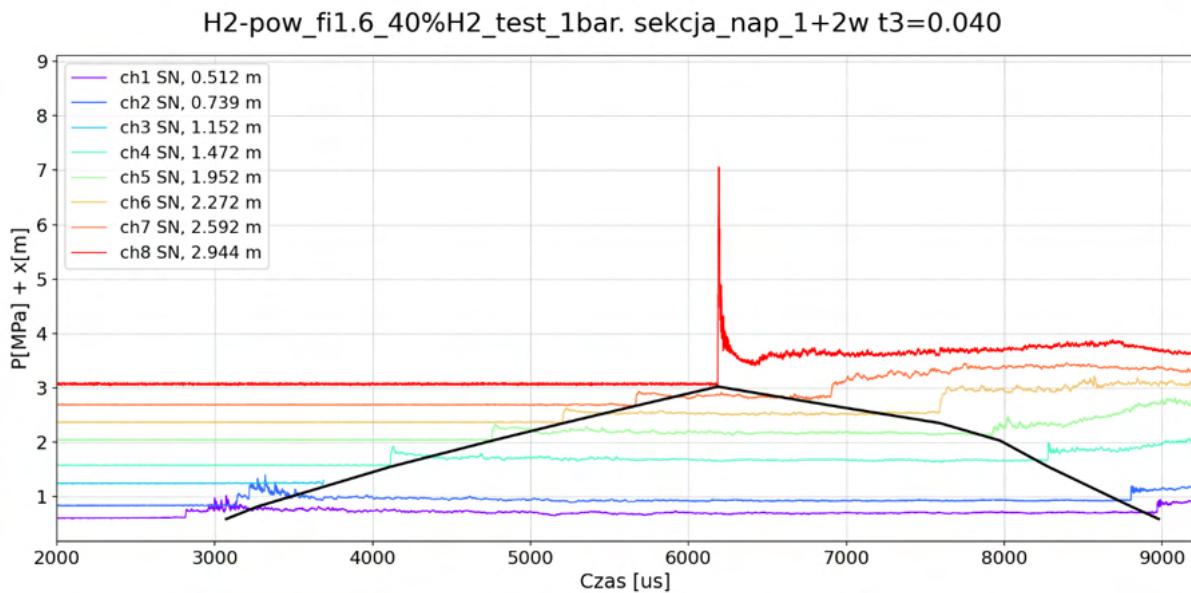
### Eksperyment 3.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



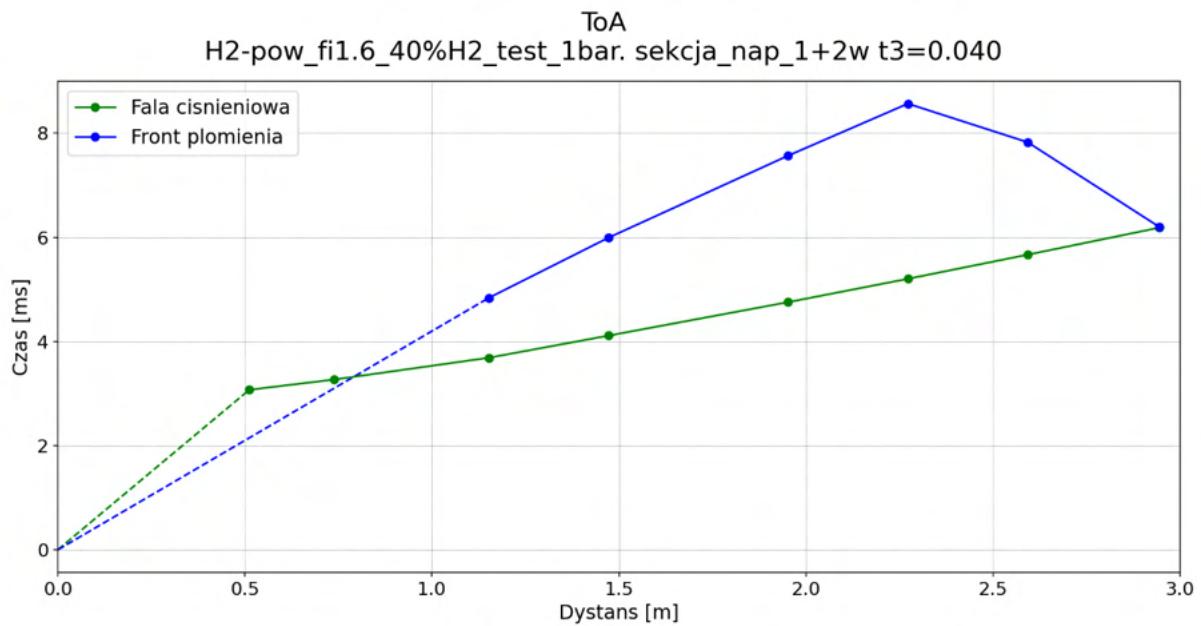
Rysunek 91 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1, 6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



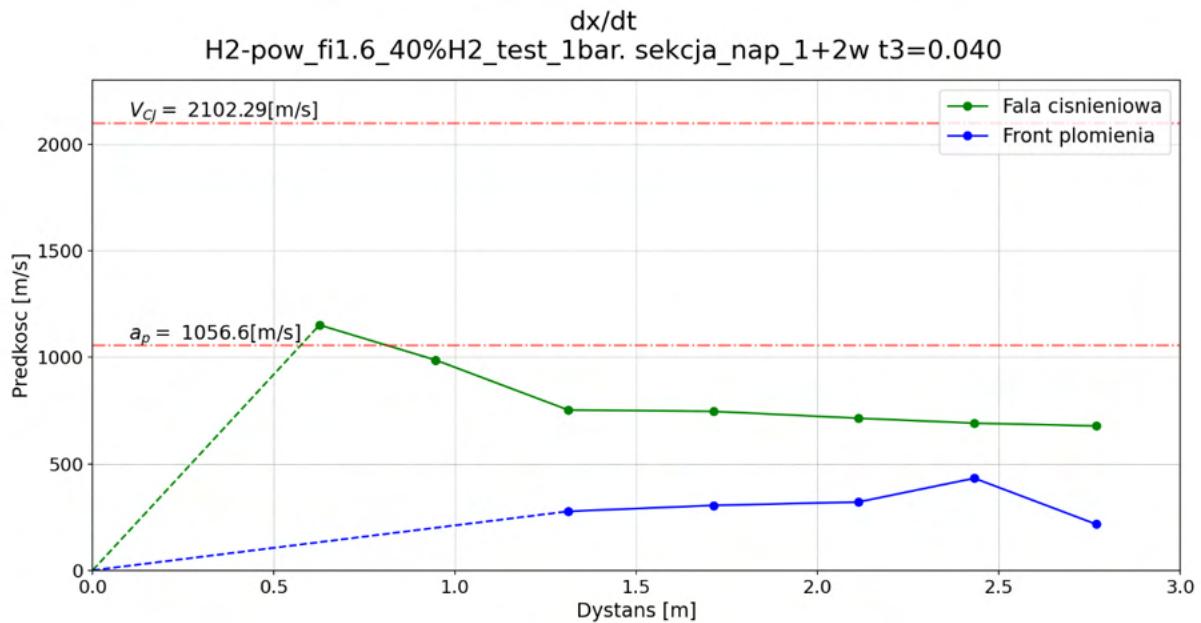
Rysunek 92 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1, 6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 93 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

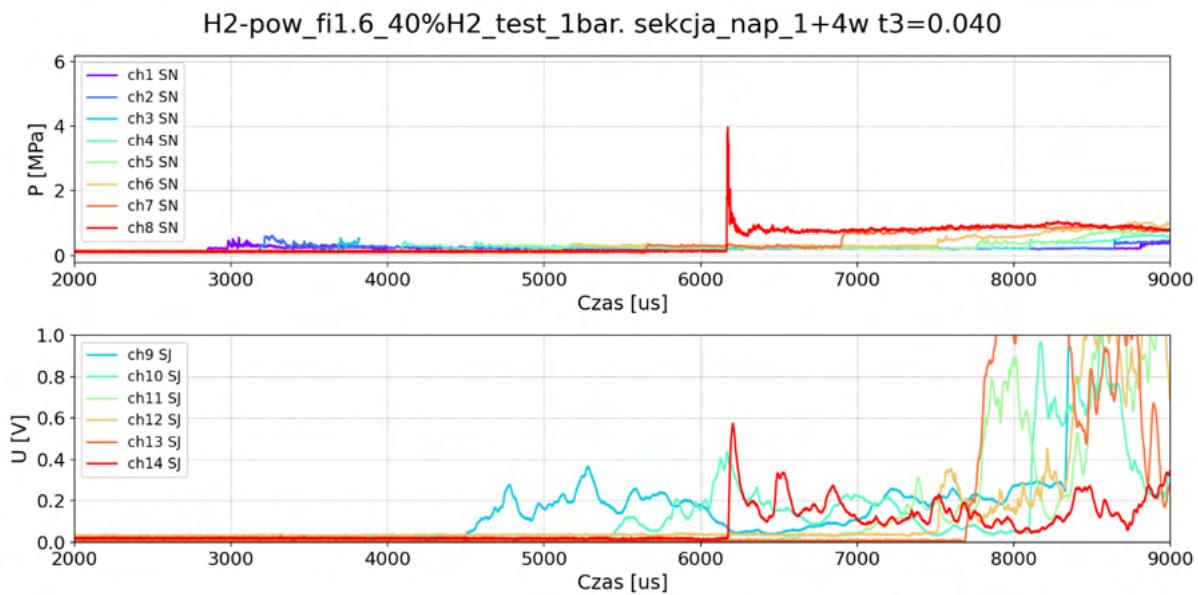


Rysunek 94 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie maksymalne w narożu o wartości 4,1 MPa. W przybliżeniu stała prędkość fali ciśnieniowej, po odbiciu fala przyspiesza wraz z odległością. W narożu zaobserwowany płomień wtórny, który propaguje w stronę sekcji napędzającej. Front płomienia początkowo w przybliżeniu o stałej prędkości, od ok. 2,2 m długości rury zwiększa prędkość, od ok. 2,45 m zwalnia. Opóźniony zapłon w narożu IDT = 11 us.

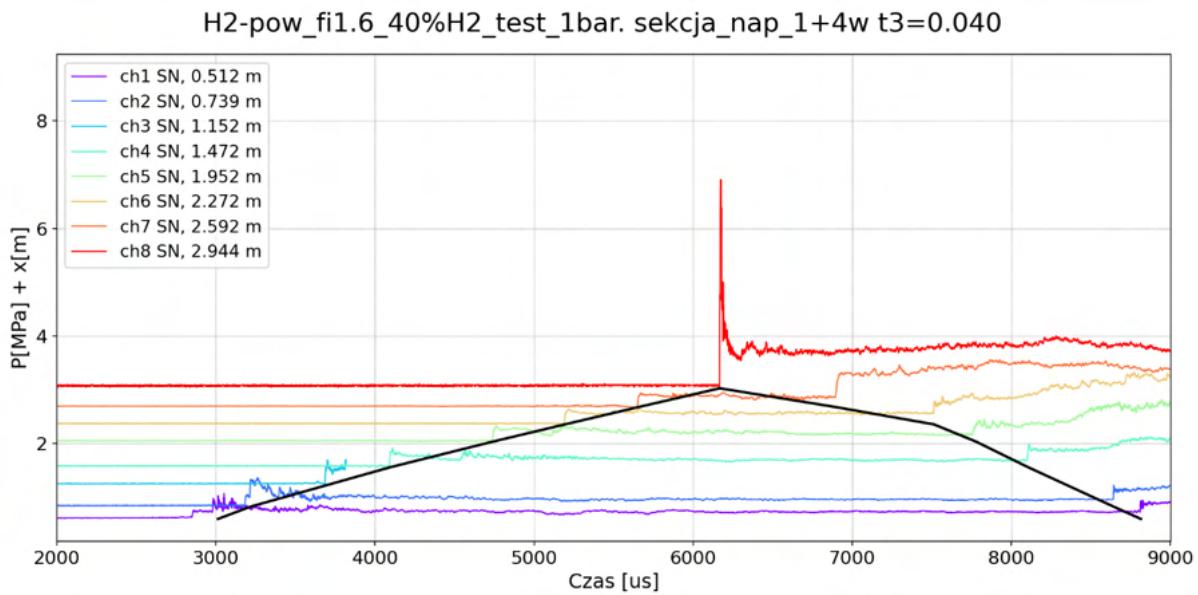
## Eksperyment 4.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



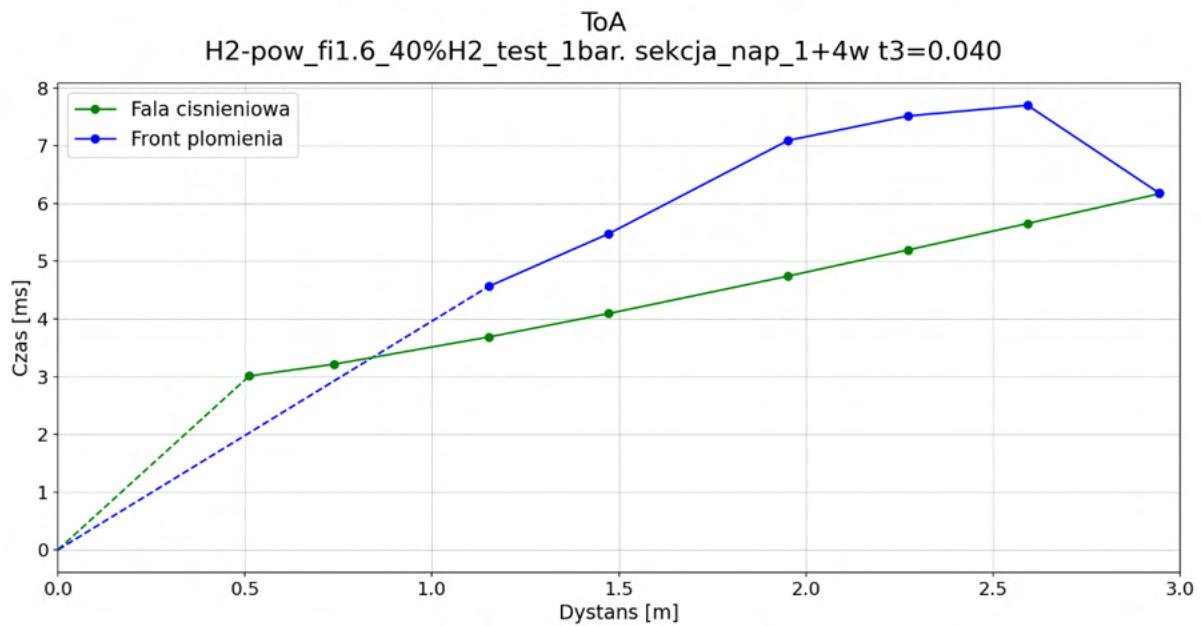
Rysunek 95 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1, 6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



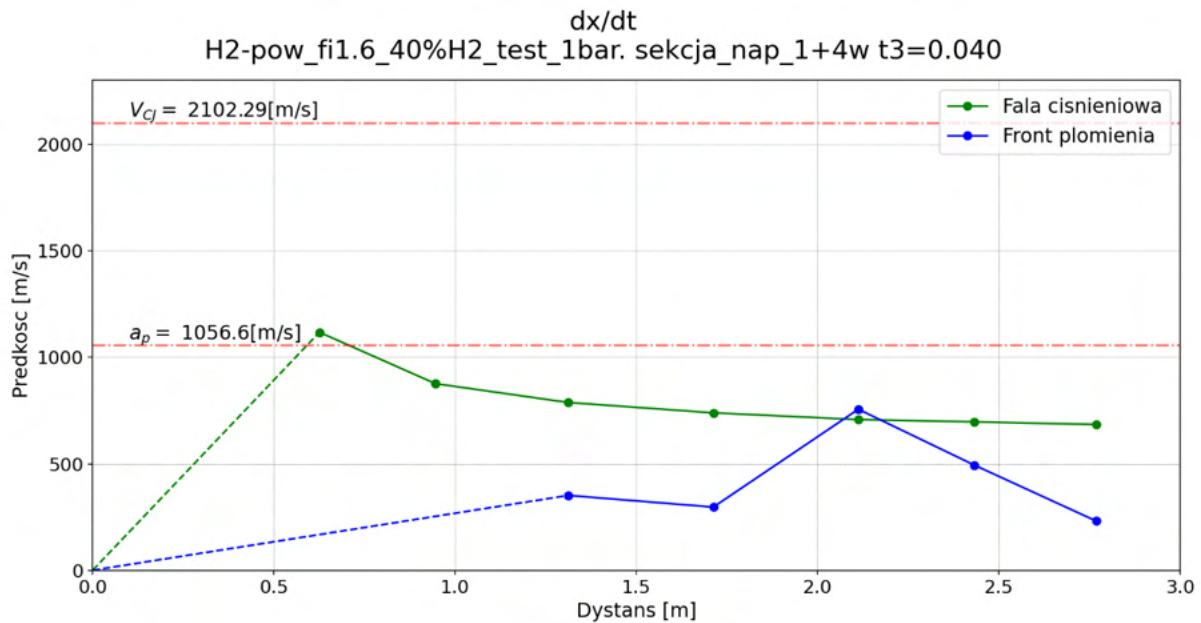
Rysunek 96 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1, 6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 97 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

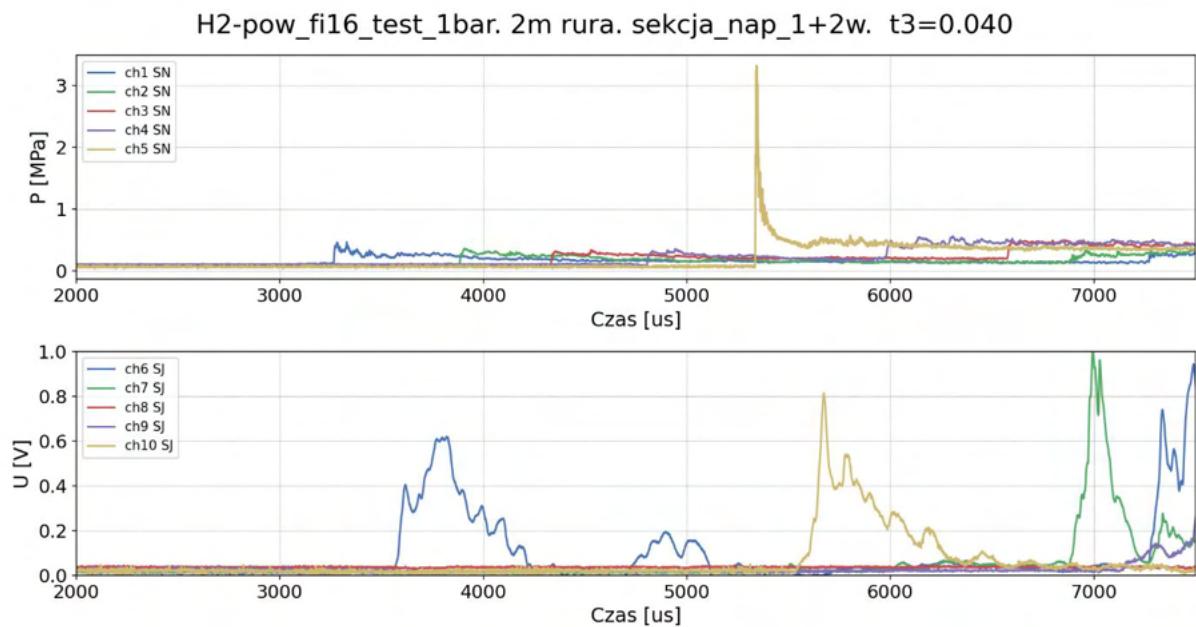


Rysunek 98 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Maksymalne ciśnienie zarejestrowane na czujniku w narożu o wartości 4,0 MPa. Fala ciśnieniowa w przybliżeniu propaguje ze stałą prędkością, po odbiciu fala wraca w przybliżeniu z podobną prędkością, a następnie w okolicy 2, m długości rury wyraźnie przyspiesza. W narożu zarejestrowany zapłon. Front płomienia o większej prędkości od fali w ok. 2,15 m, następnie zwalnia. Opóźniony zapłon w narożu IDT = 11 us.

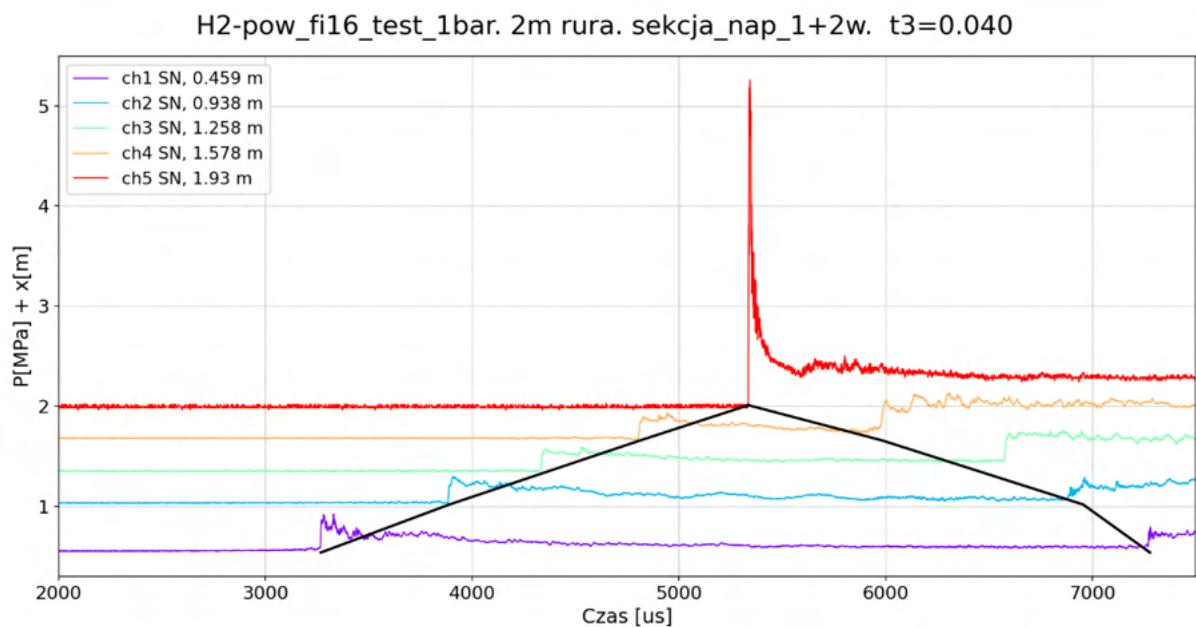
## Eksperyment 5.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



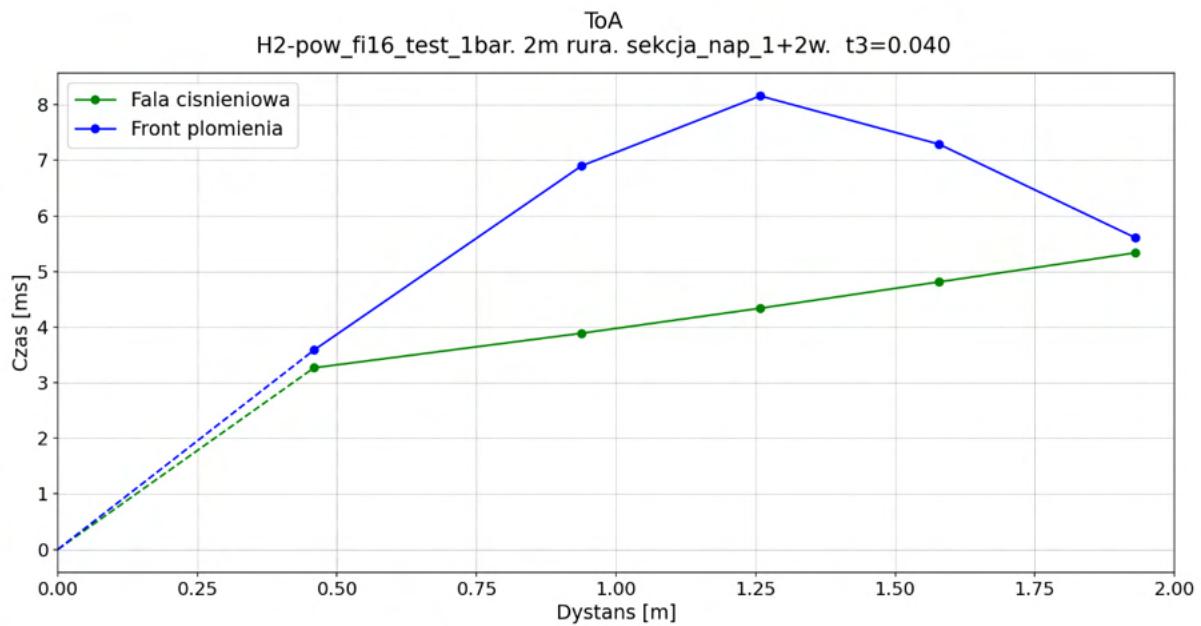
Rysunek 99 Eksperyment 5 ( $\Phi = 1, 6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



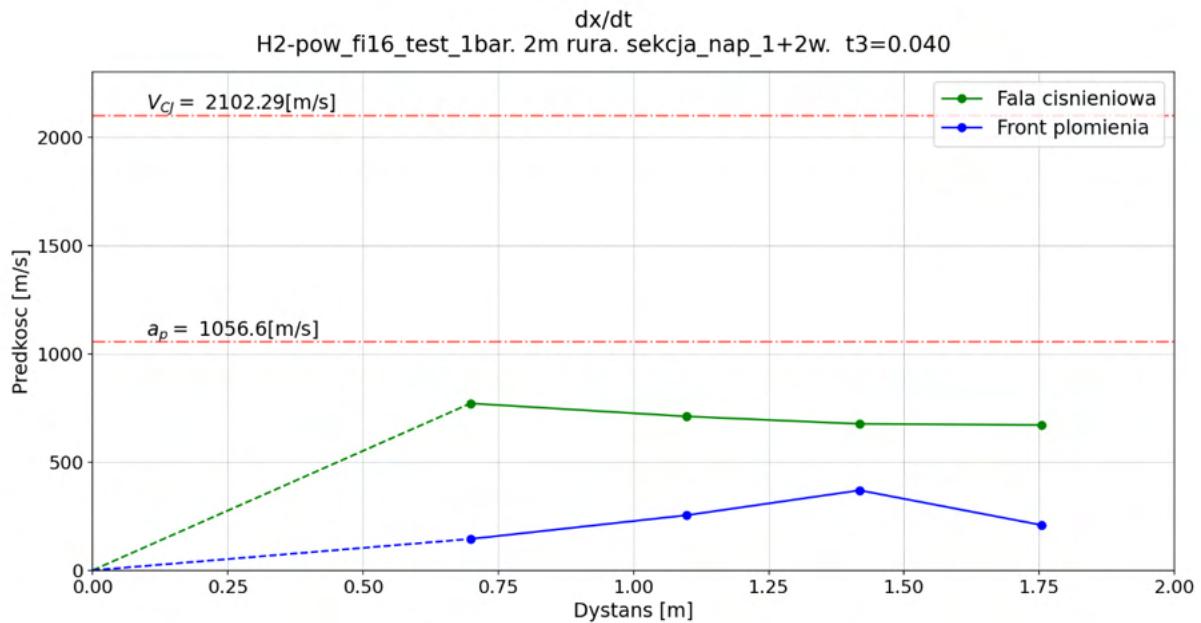
Rysunek 100 Eksperyment 5 ( $\Phi = 1, 6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 101 Eksperyment 5 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

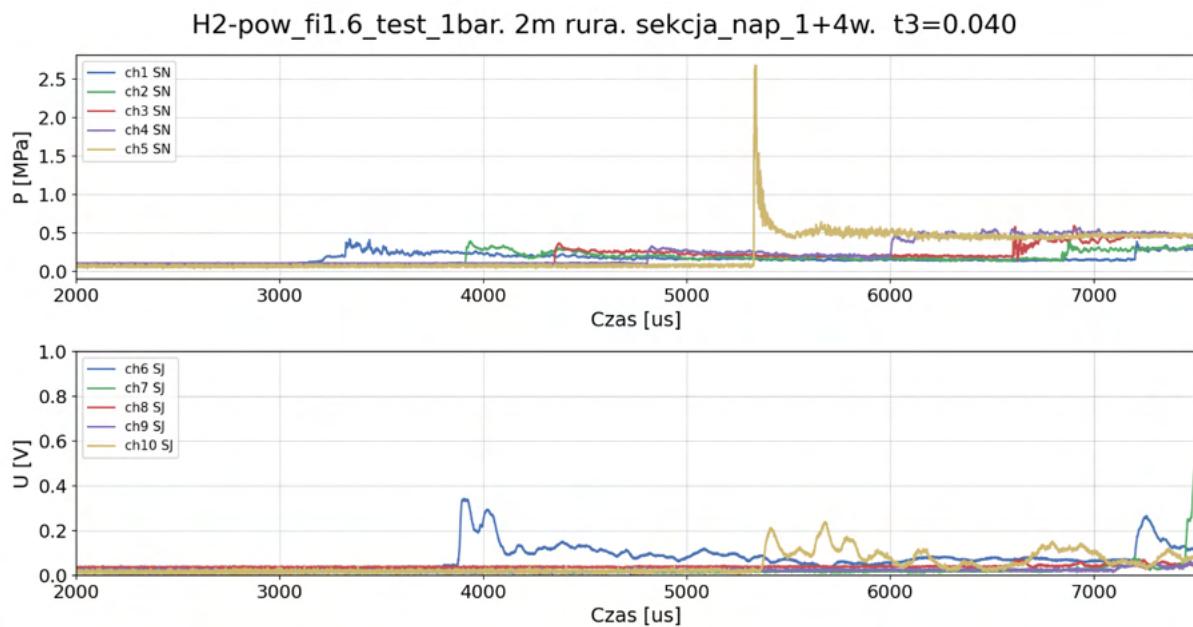


Rysunek 102 Eksperyment 5 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Maksymalne ciśnienie w narożu o wartości 3,3 MPa. W przybliżeniu stała prędkość fali ciśnieniowej na całej długości rury, po odbiciu fala wraca z podobną prędkością, a następnie przyspiesza w okolicy 1 m długości rury. Liniowy wzrost prędkości płomienia wzdłuż rury, a następnie zwalnianie w końcowej części. Widoczny płomień wtórny zainicjowany w narożu propagujący w stronę przeciwną niż płomień pierwotny. Opóźniony zapłon w narożu IDT = 271 us.

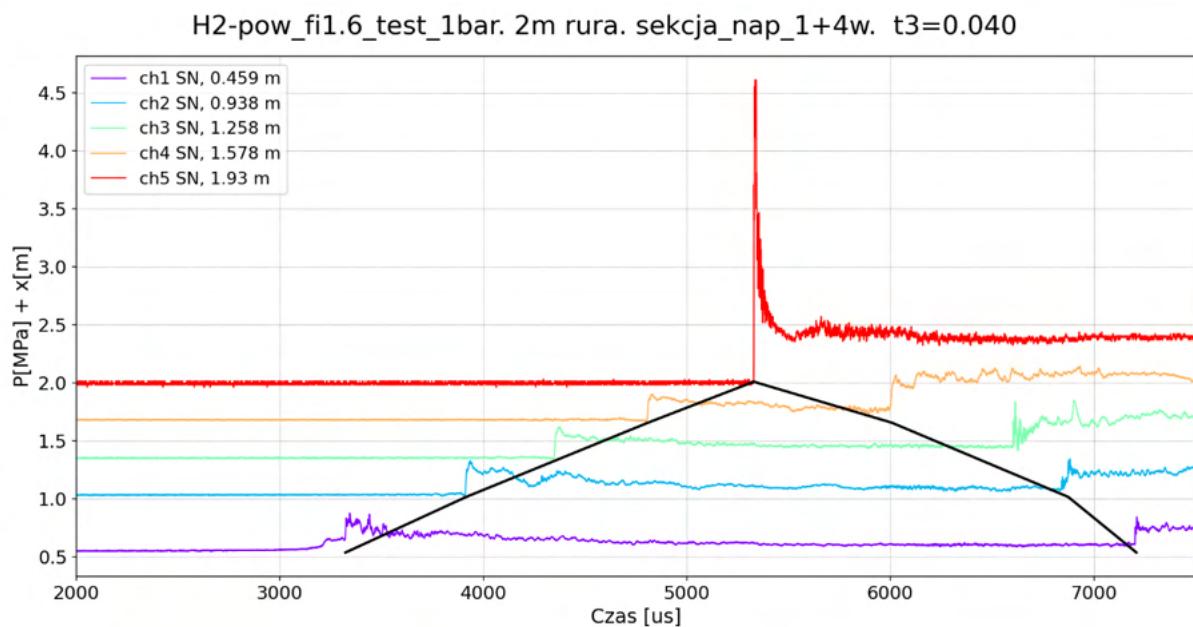
## Eksperyment 6.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



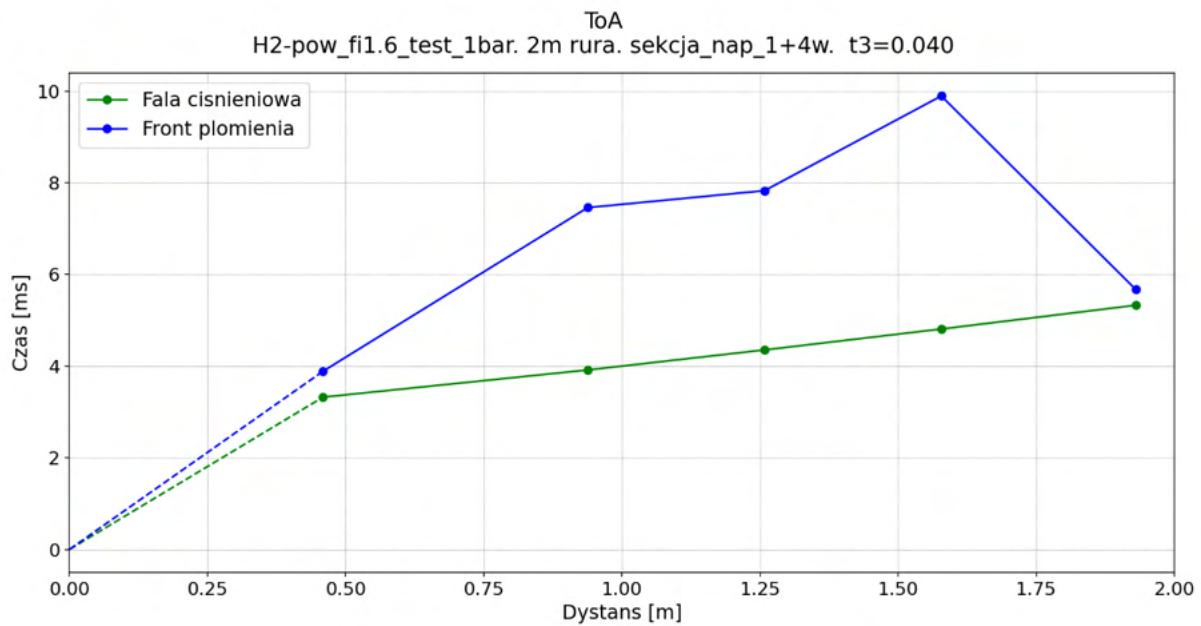
Rysunek 103 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1, 6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



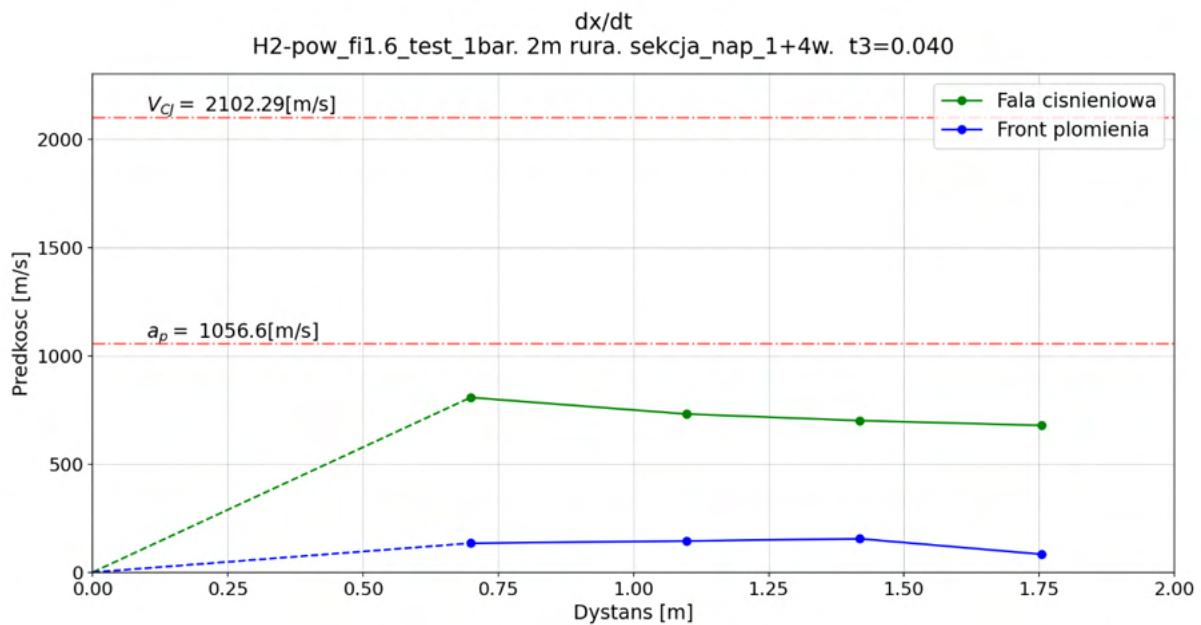
Rysunek 104 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1, 6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 105 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

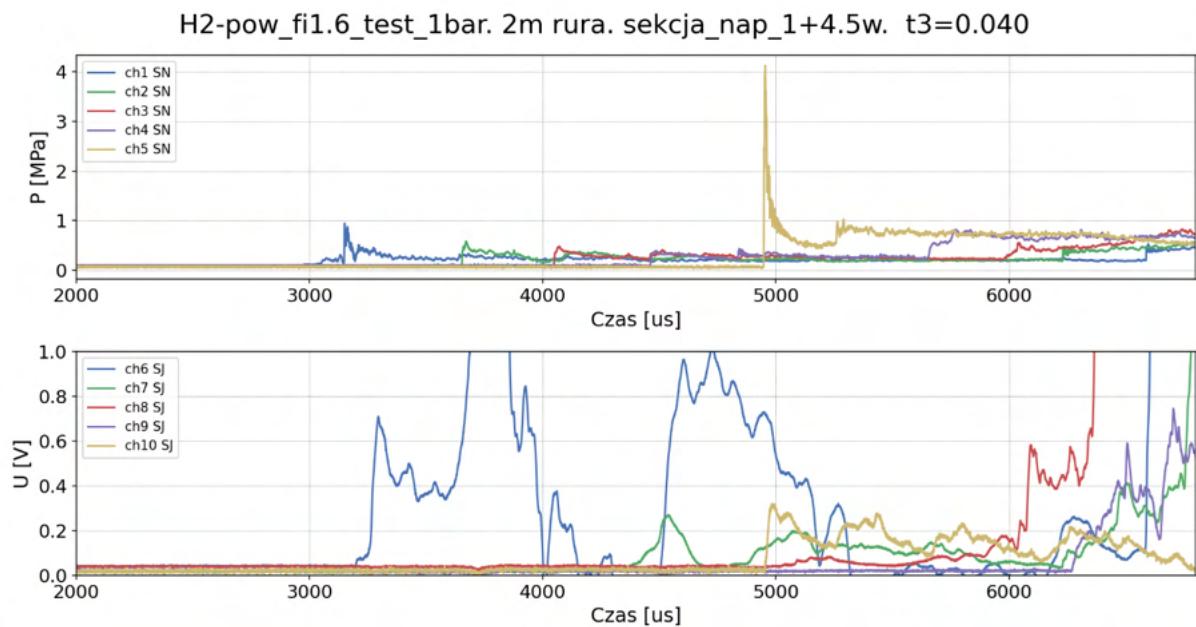


Rysunek 106 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie maksymalne zarejestrowane w narożu o wartości 2,7 MPa. Fala ciśnieniowa propaguje wzdłuż długości rury w przybliżeniu ze stałą prędkością, po odbiciu fala wraca z prędkością zbliżoną, następnie przyspiesza w okolicy 1 m długości rury. Zaobserwowany płomień wtórny powstał w narożu. Prędkość frontu płomienia w przybliżeniu stała, w końcowej części rury maleje. Opóźniony zapłon IDT = 342,5 us.

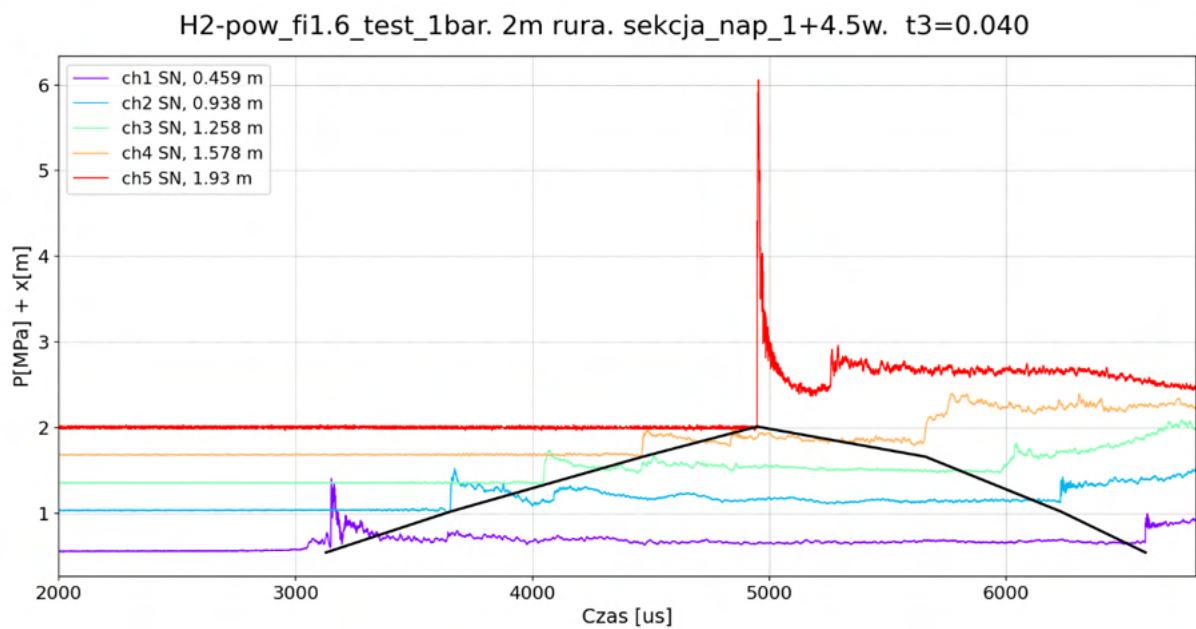
## Eksperyment 7.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



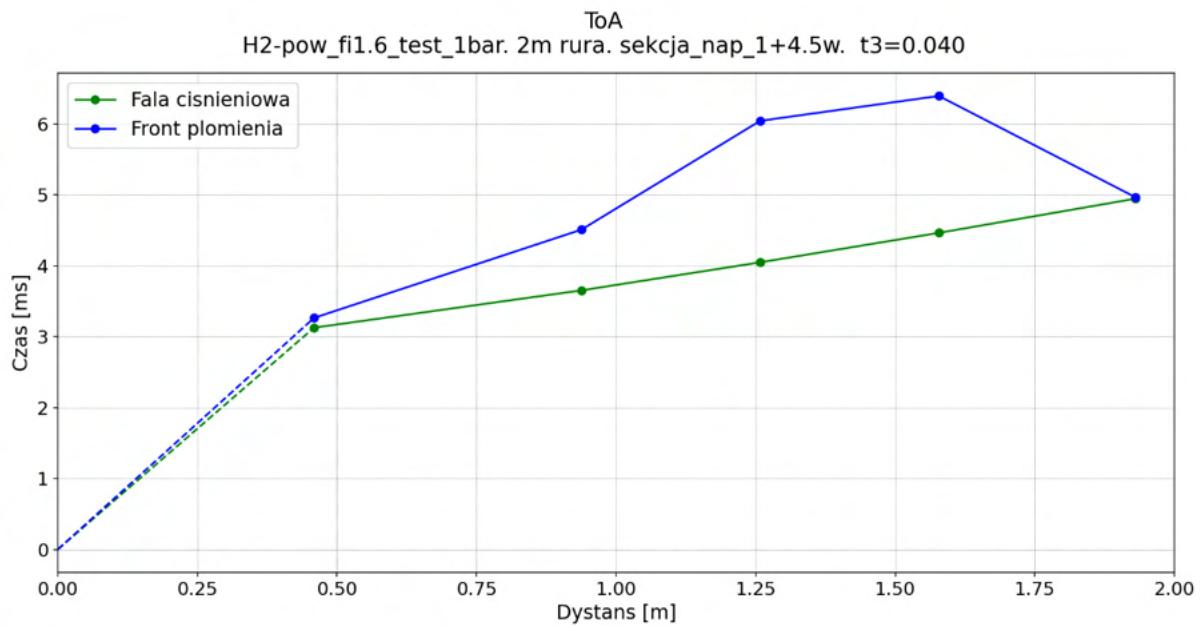
Rysunek 107 Eksperyment 7 ( $\Phi = 1, 6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



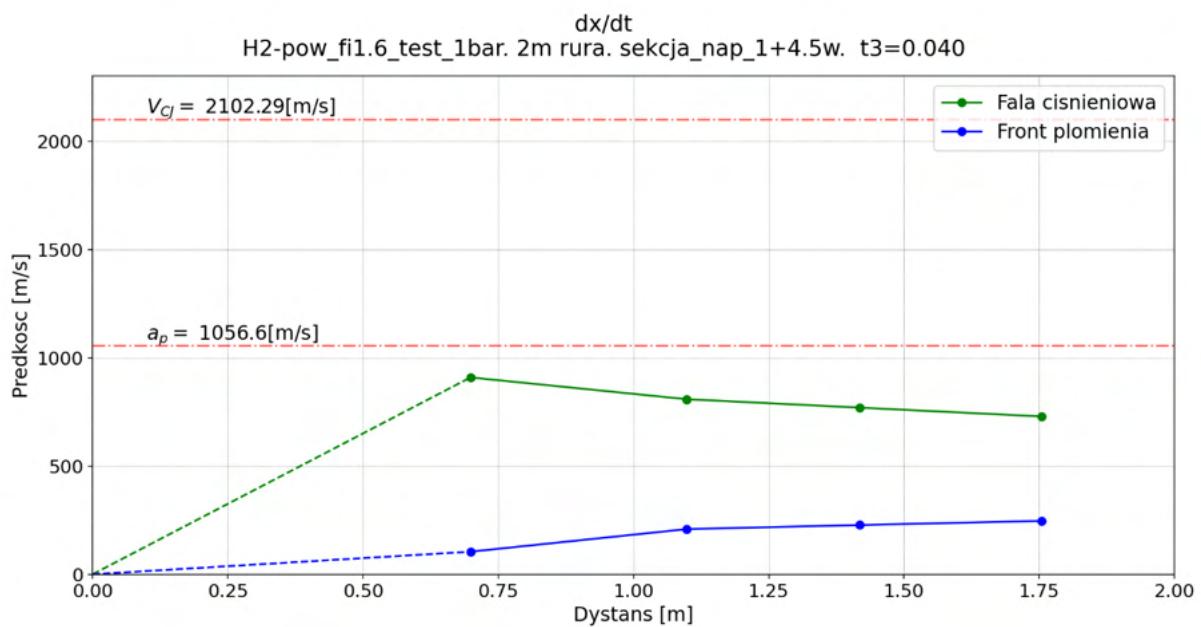
Rysunek 108 Eksperyment 7 ( $\Phi = 1, 6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 109 Eksperyment 7 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

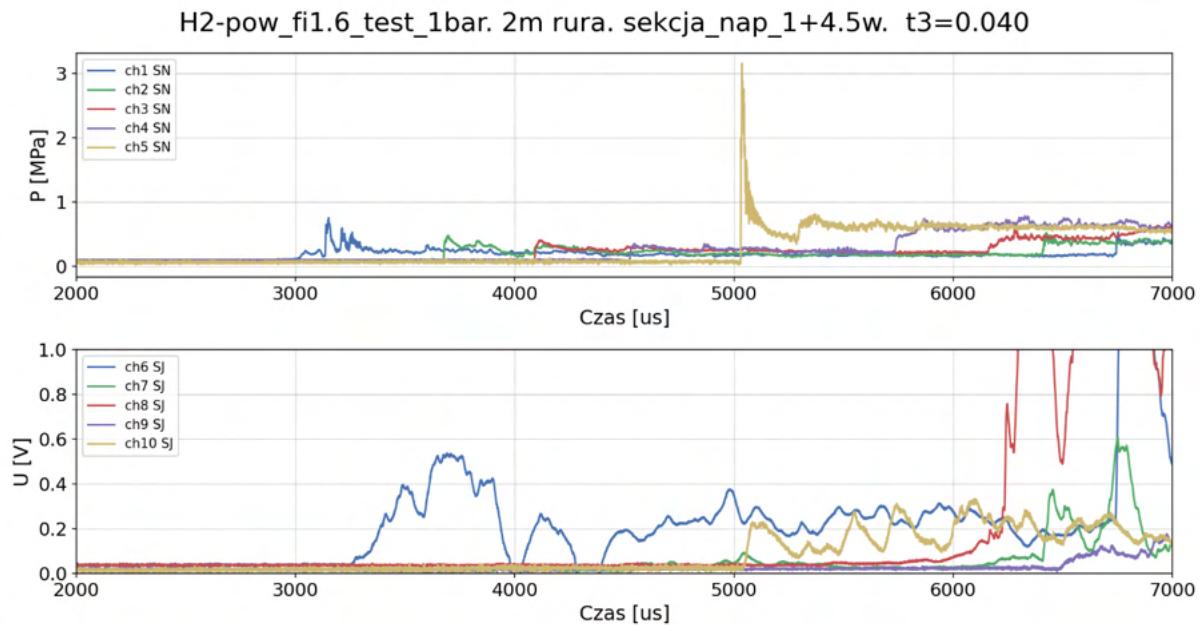


Rysunek 110 Eksperyment 7 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie maksymalne w narożu o wartości 4,1 MPa. Propagacja fali ciśnieniowej w przybliżeniu ze stałą prędkością od około 1,1 m, po odbiciu powrót z prędkością podobną, wyraźne przyspieszenie zaobserwowane w okolicy 1,7 m długości rury. Widoczny płomień wtórny zainicjowany w narożu. Prędkość frontu płomienia liniowo rośnie na całej długości rury. Opóźniony zapłon w narożu IDT = 20,5 us.

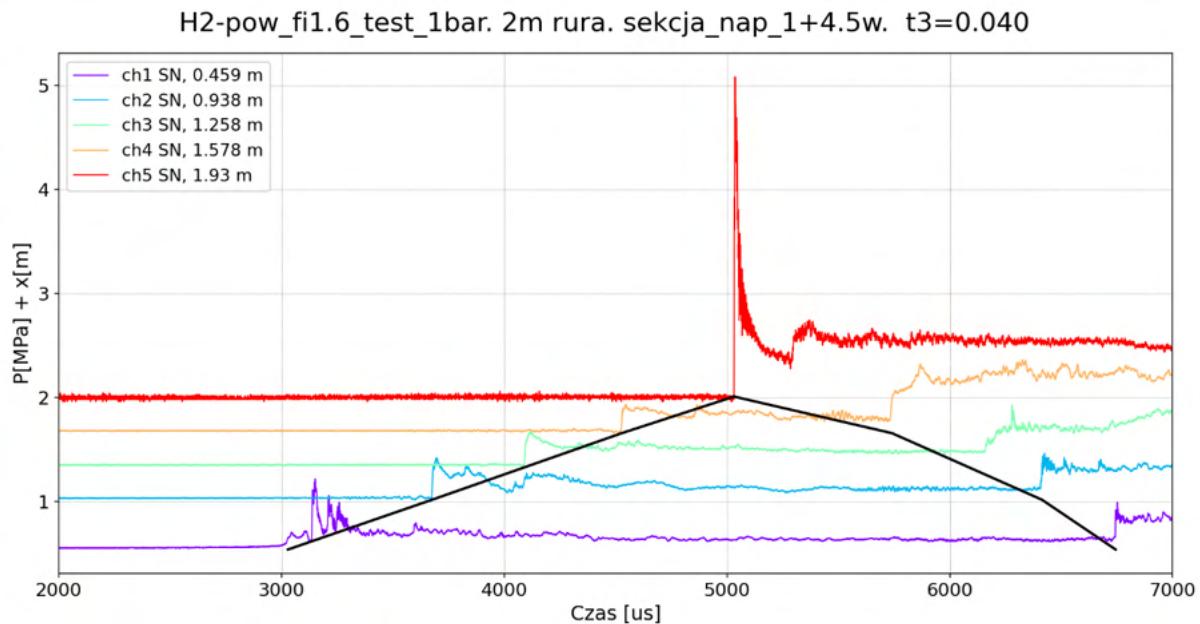
## Eksperyment 8.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



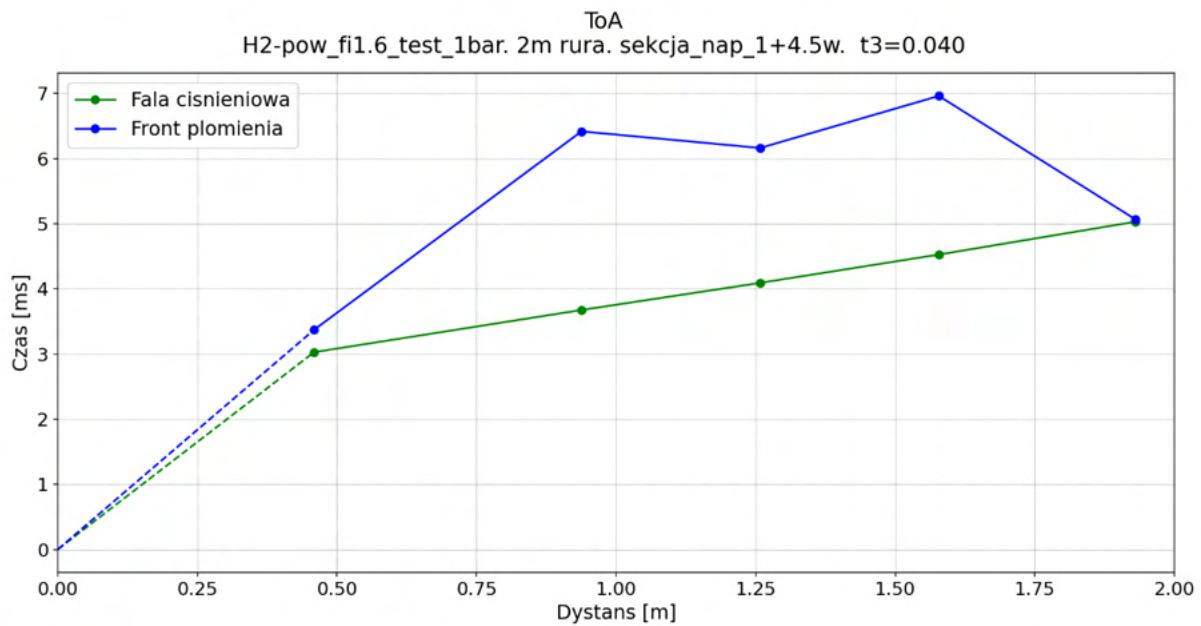
Rysunek 111 Eksperyment 8 ( $\Phi = 1, 6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



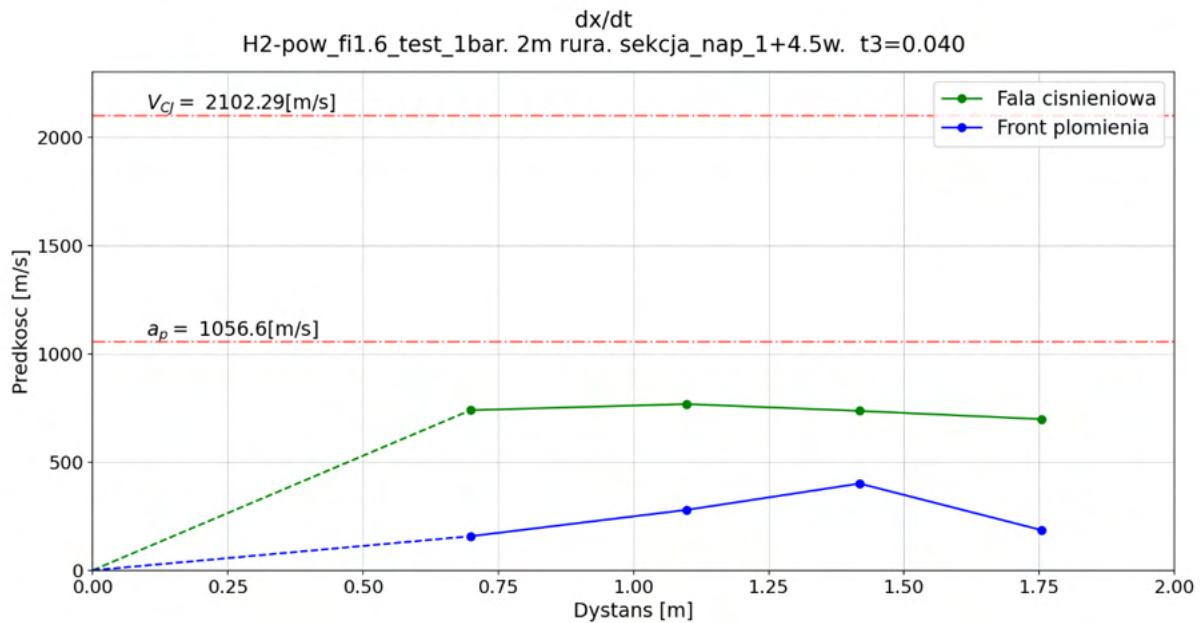
Rysunek 112 Eksperyment 8 ( $\Phi = 1, 6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 113 Eksperyment 8 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

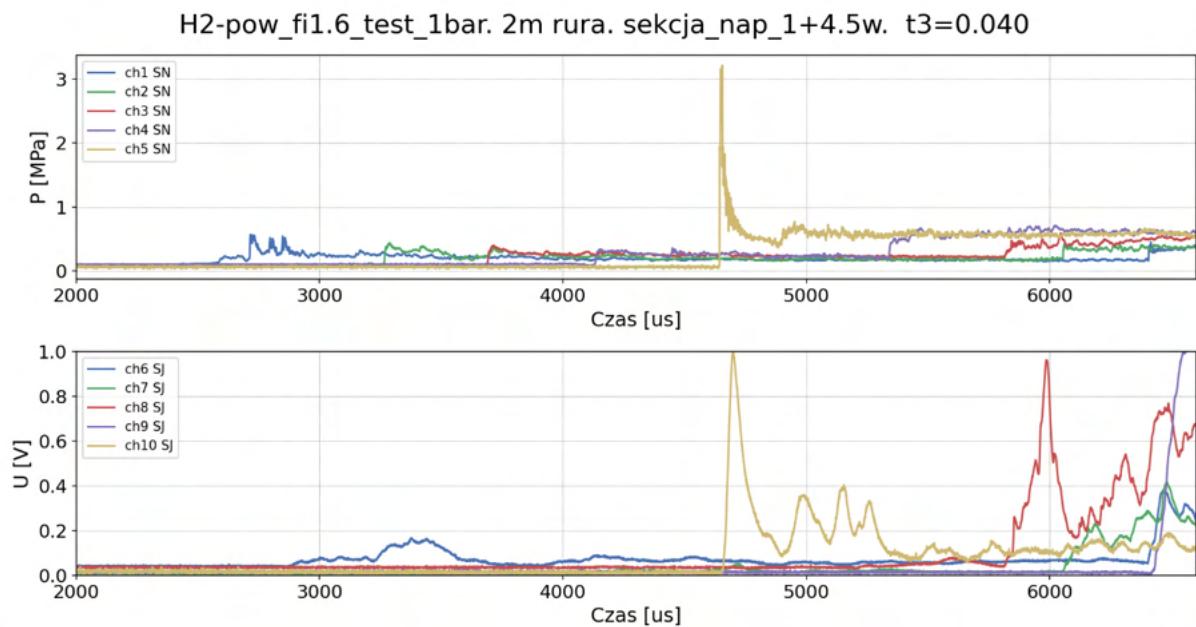


Rysunek 114 Eksperyment 8 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie maksymalne w narożu o wartości 3,2 MPa. W przybliżeniu stała prędkość fali ciśnieniowej na całej długości rury, po odbiciu fala zwiększa prędkość wraz z odległością. Widoczny zapłon w narożu. Na środkowej sondzie widoczna wcześniejsze aktywacja (przyczyną może być zniekształcenie płomienia przy ściankach) lub błędnie odczytana wartość ToA sondy nr 2. Front płomienia rośnie liniowo do ok. 1,4 m długości rury, następnie prędkość spada. Opóźniony zapłon w narożu IDT = 37 us.

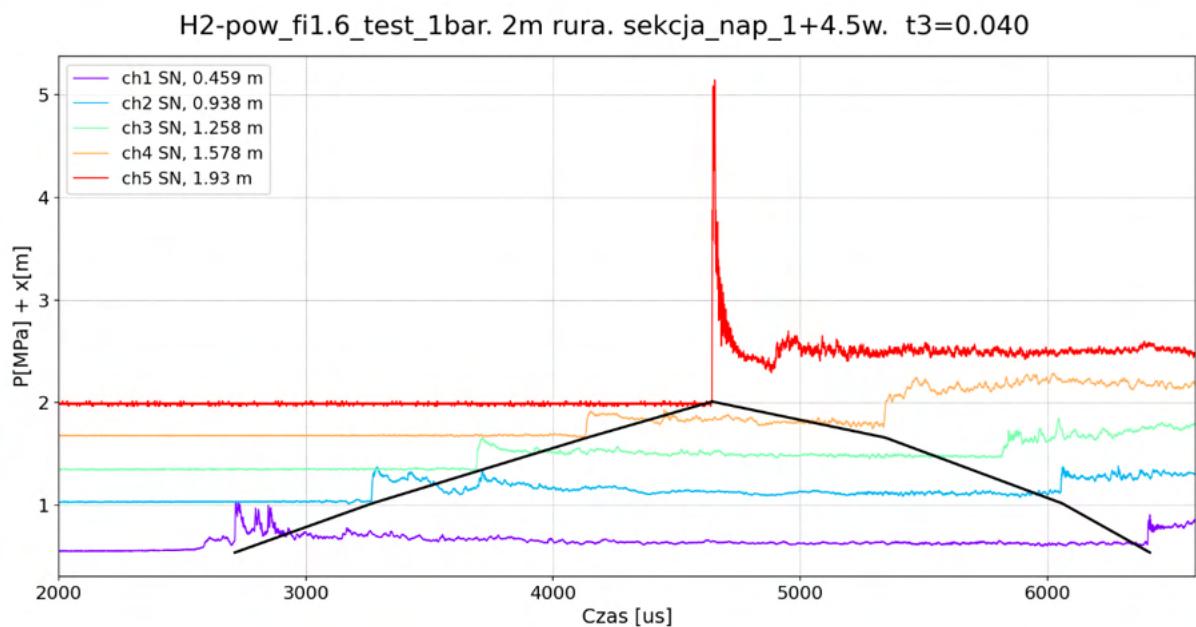
## Eksperyment 9.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



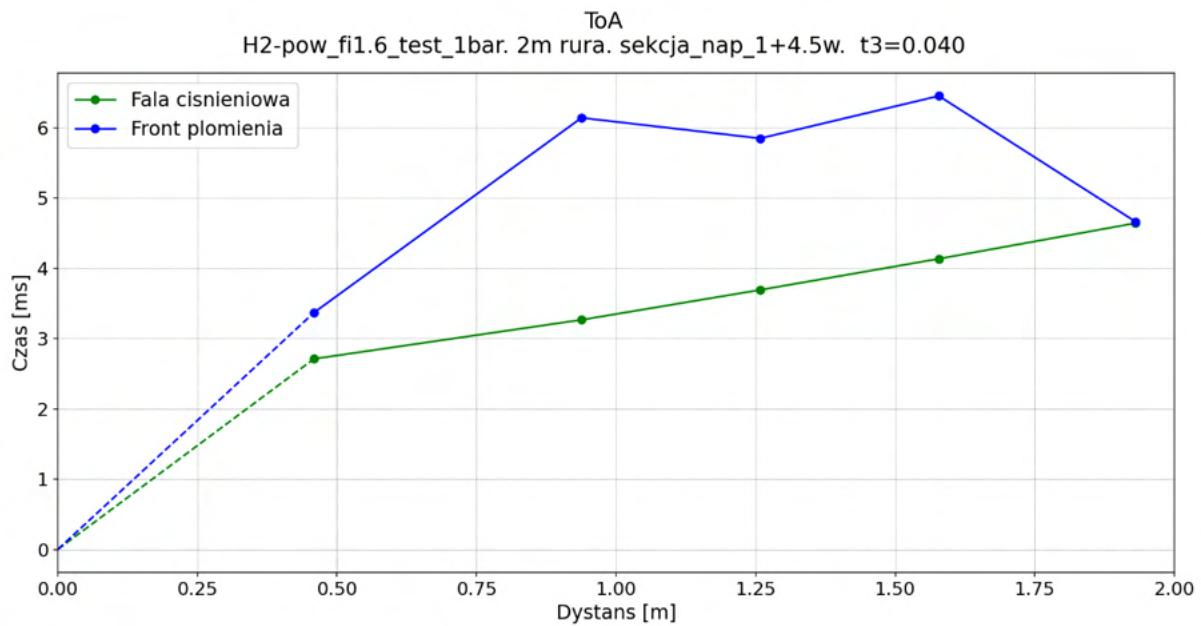
Rysunek 115 Eksperyment 9 ( $\Phi = 1, 6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



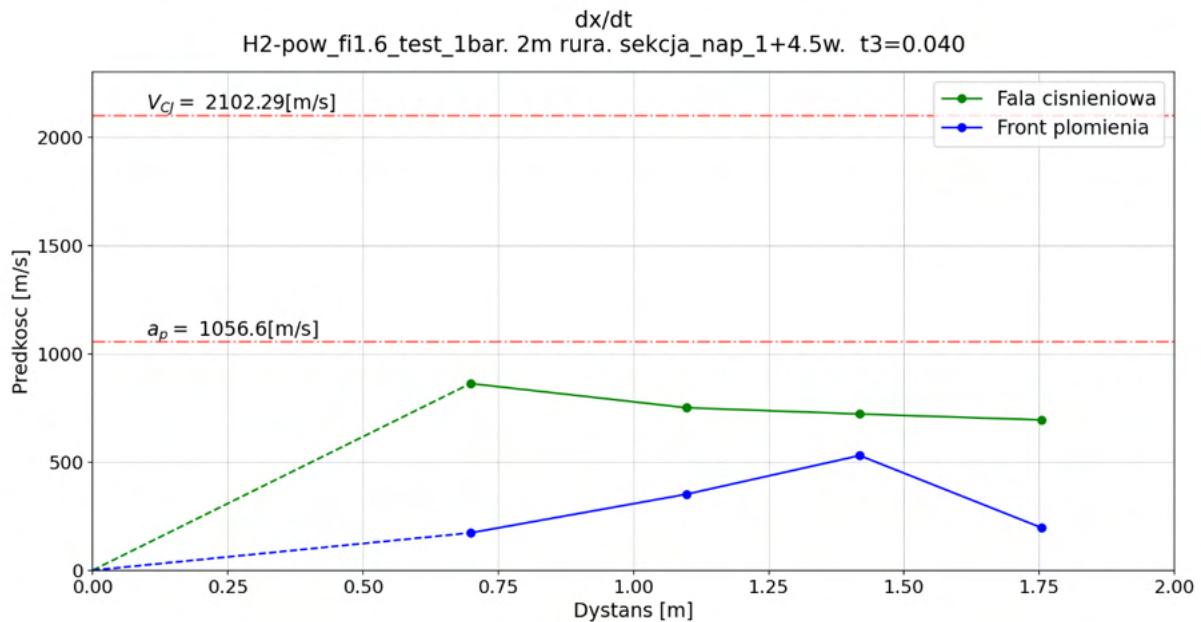
Rysunek 116 Eksperyment 9 ( $\Phi = 1, 6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 117 Eksperyment 9 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

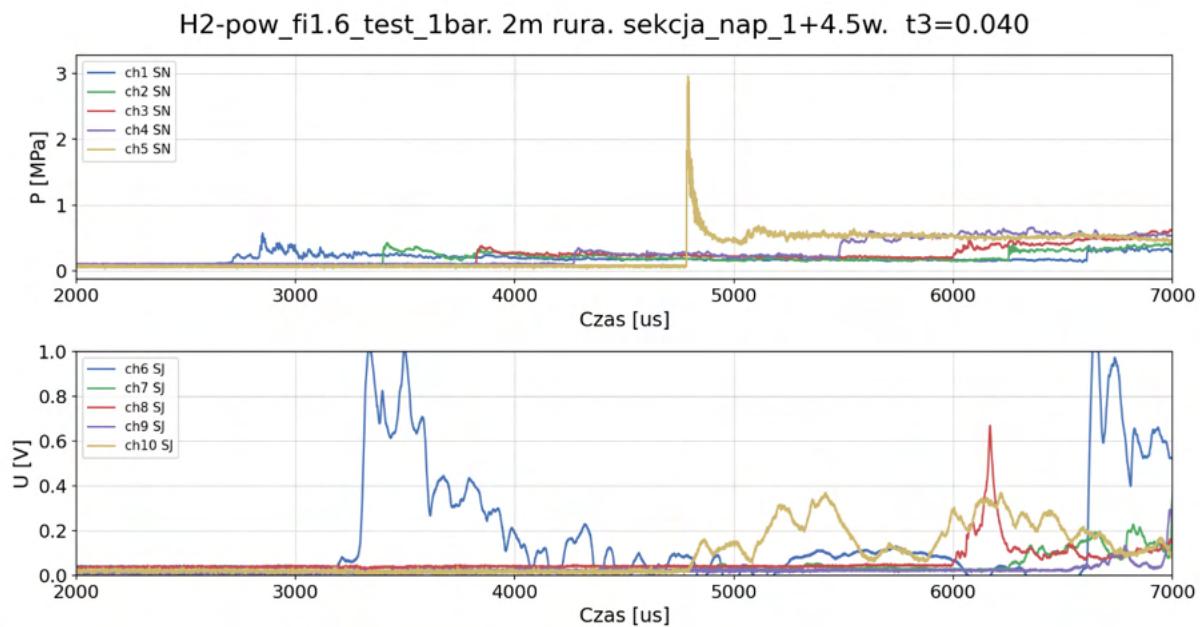


Rysunek 118 Eksperyment 9 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie maksymalne zarejestrowane w narożu o wartości 3,2 MPa. Fala ciśnieniowa przyspiesza do ok 1,1 długości rury, następnie w przybliżeniu stała prędkość fali. Po odbiciu w narożu prędkość fali rośnie wraz z odległością. W narożu zaobserwowany płomień wtórny. Zadziałanie sondy środkowej może wynikać ze zniekształconego przy ściankach płomienia. Wyraźny, liniowy wzrost prędkości płomienia wzduł rury, od około 1,4 m długości kanału płomień zwalnia. Opóźniony zapłon w narożu o wartości IDT = 23 us.

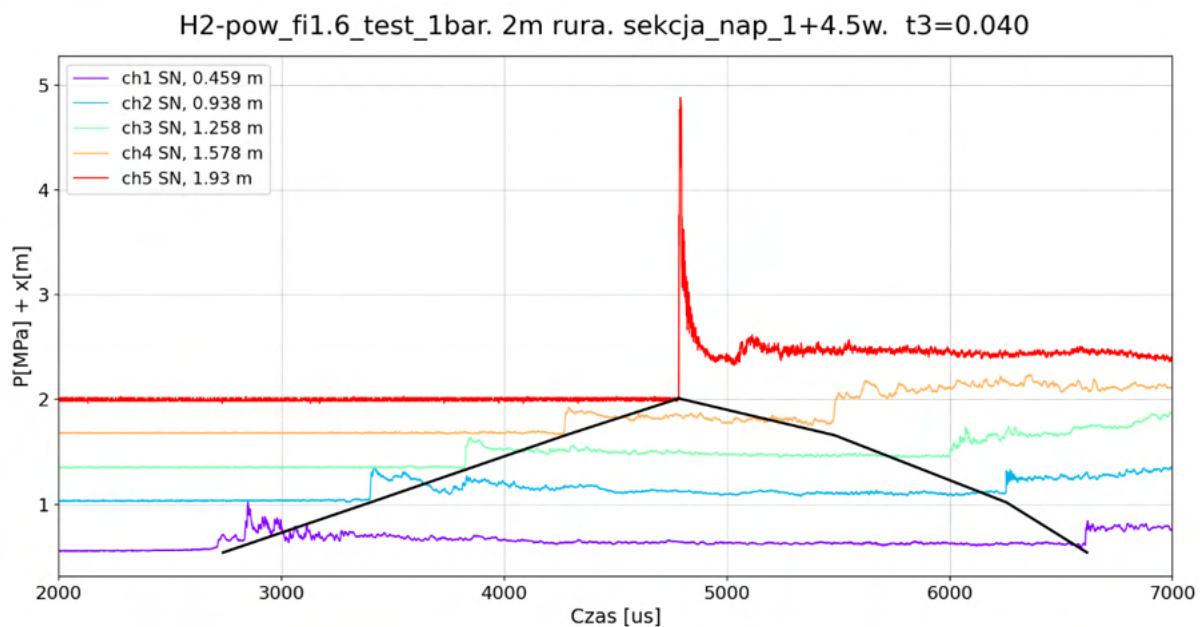
## Eksperyment 10.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



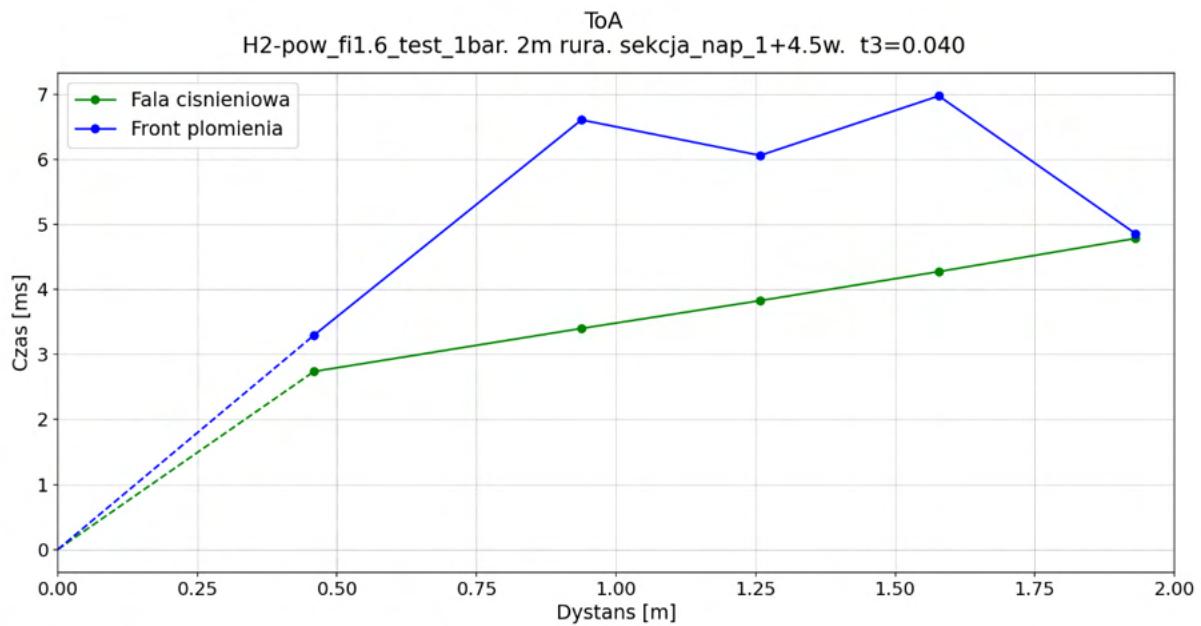
Rysunek 119 Eksperyment 10 ( $\Phi = 1,6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



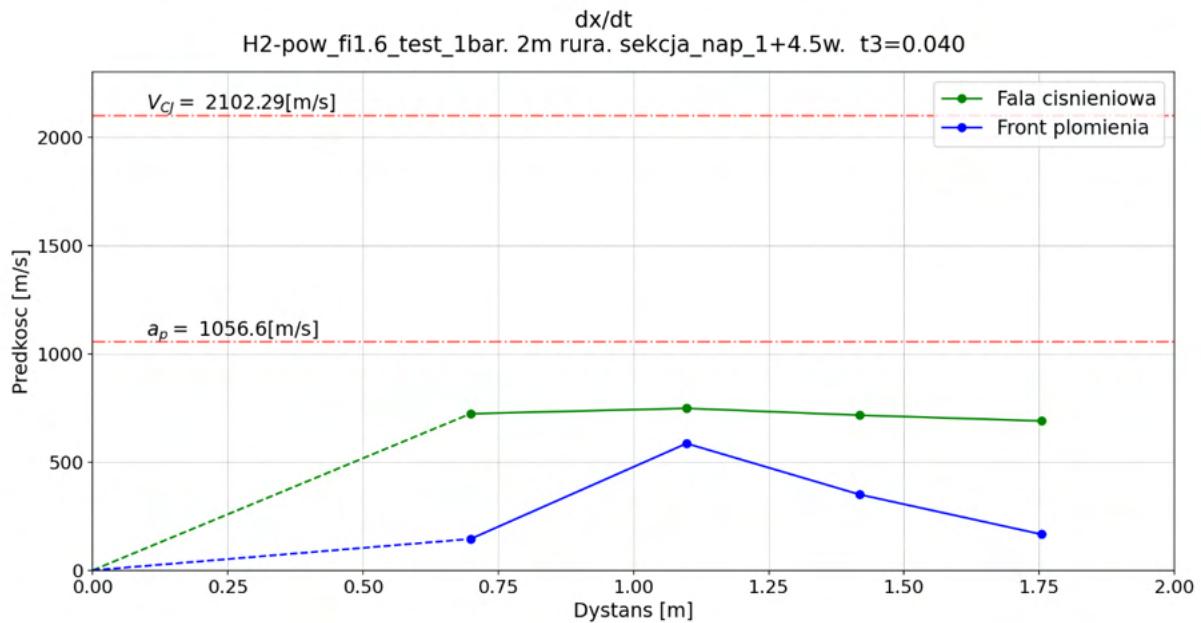
Rysunek 120 Eksperyment 10 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 121 Eksperyment 10 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

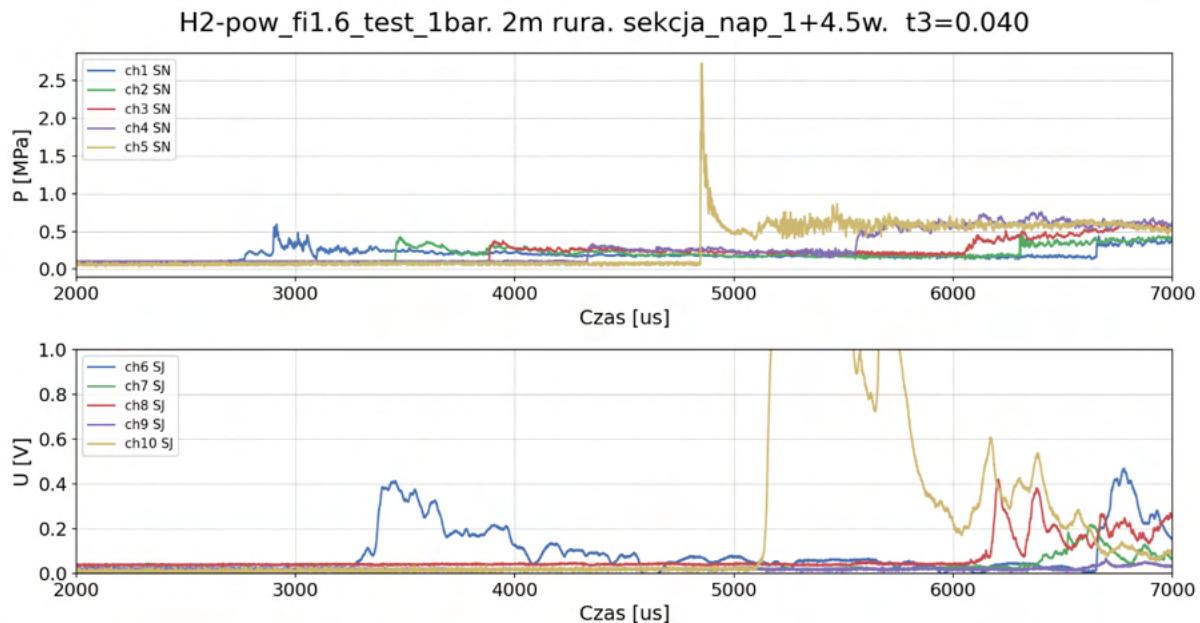


Rysunek 122 Eksperyment 10 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Maksymalne ciśnienie w narożu wynosi 2,9 MPa. Prędkość fali ciśnieniowej w przybliżeniu stała wzdłuż rury, po odbiciu wzrasta wraz z odległością. Front płomienia przyspiesza do ok. 1,1 m długości rury, następnie liniowo zwalnia. Zaobserwowano płomień wtórnego w narożu, na wczesny pomiar środkowej sondy wpływa zniekształcenie płomienia przy ściankach. Prędkość płomienia rośnie do około 1,1 m długość rury, następnie prędkość liniowo maleje. Opóźniony zapłon w narożu IDT = 75 us.

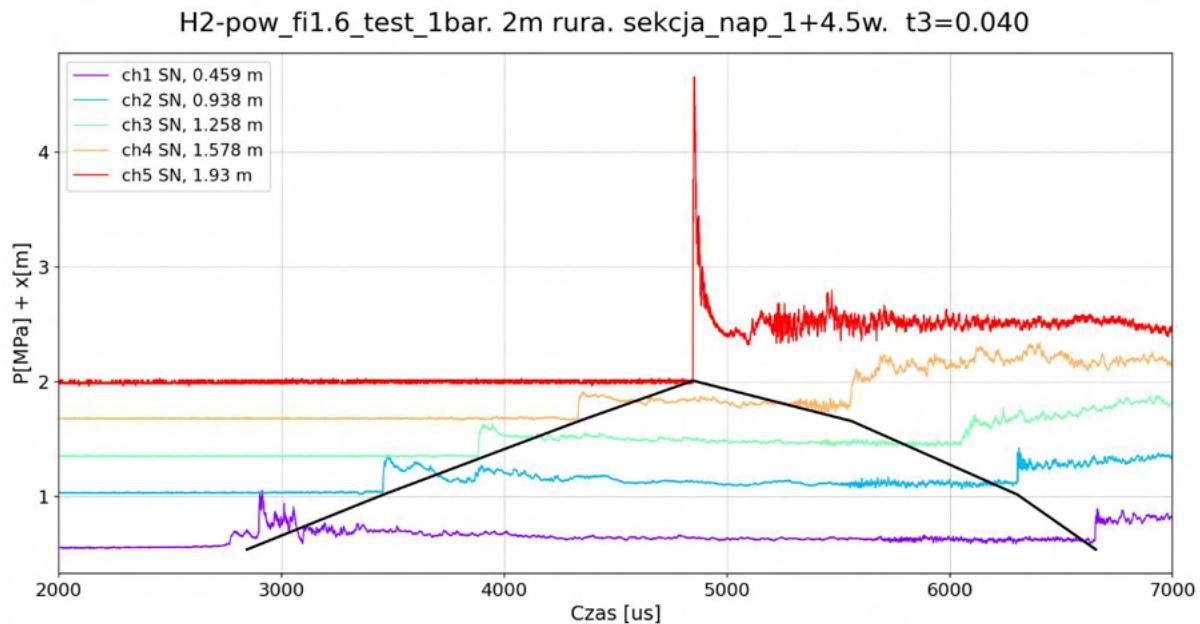
## Eksperyment 11.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



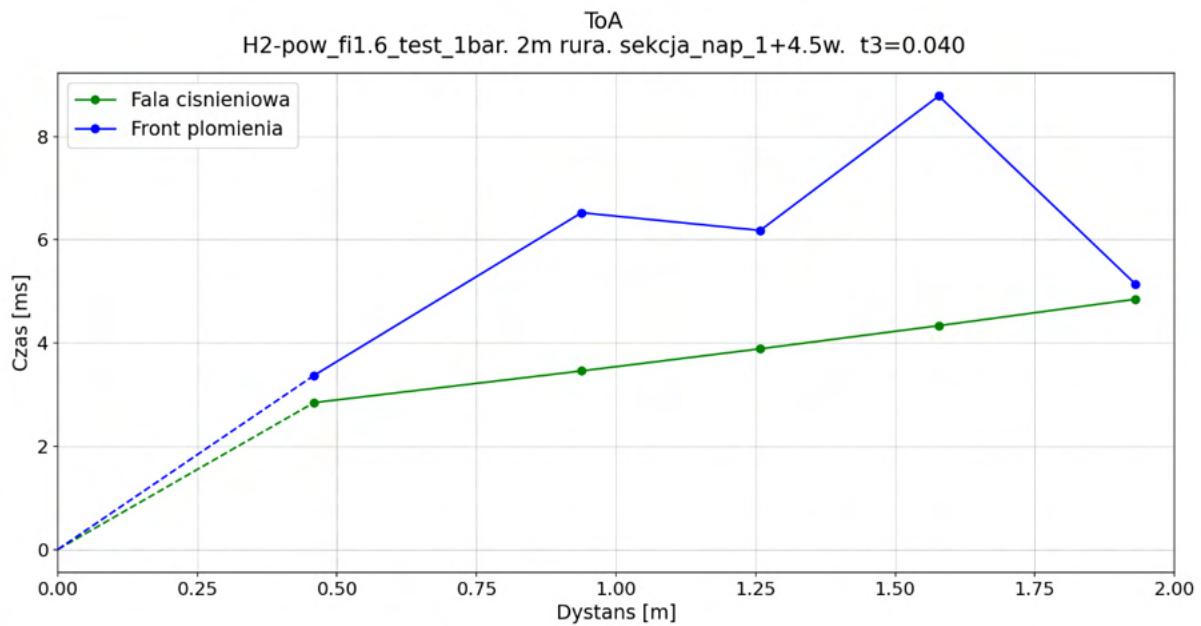
Rysunek 123 Eksperyment 11 ( $\Phi = 1,6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



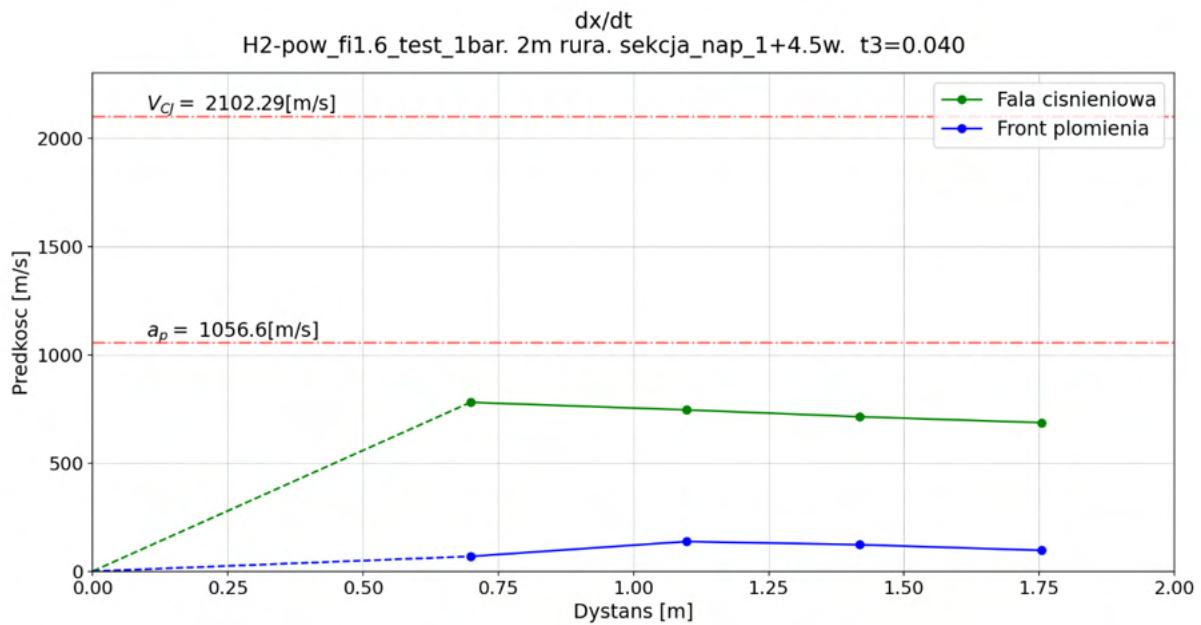
Rysunek 124 Eksperyment 11 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 125 Eksperyment 11 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

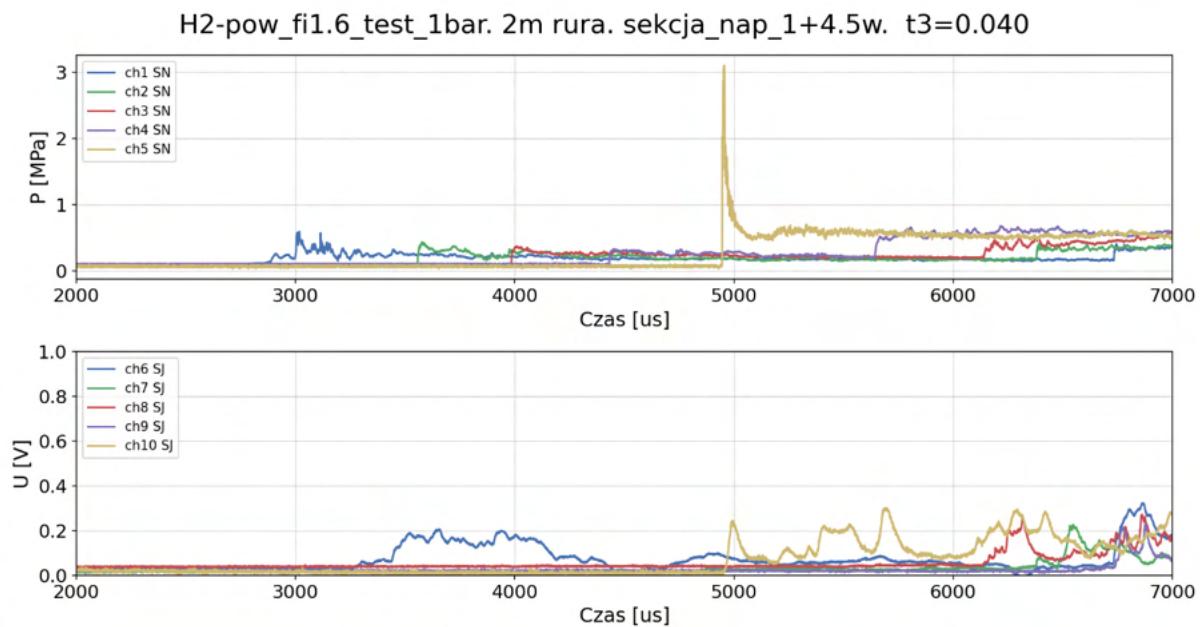


Rysunek 126 Eksperyment 11 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Wartość maksymalna ciśnienia o wartości 2,72 MPa w narożu. Fala ciśnieniowa przyspiesza do ok. 1,1 m długości rury, następnie w przybliżeniu stała prędkość. Po odbiciu fala przyspiesza wraz z odległością. Zaobserwowano zainicjowany płomień wtórny w narożu. Aktywacja sondy środkowej najprawomocniej spowodowana zniekształconym płomieniem przy ścianceach. Prędkość płomienia minimalnie rośnie do około 1,1 m wzdłuż rury, następnie delikatnie maleje. Opóźniony zapłon w naroży IDT = 294,5 us.

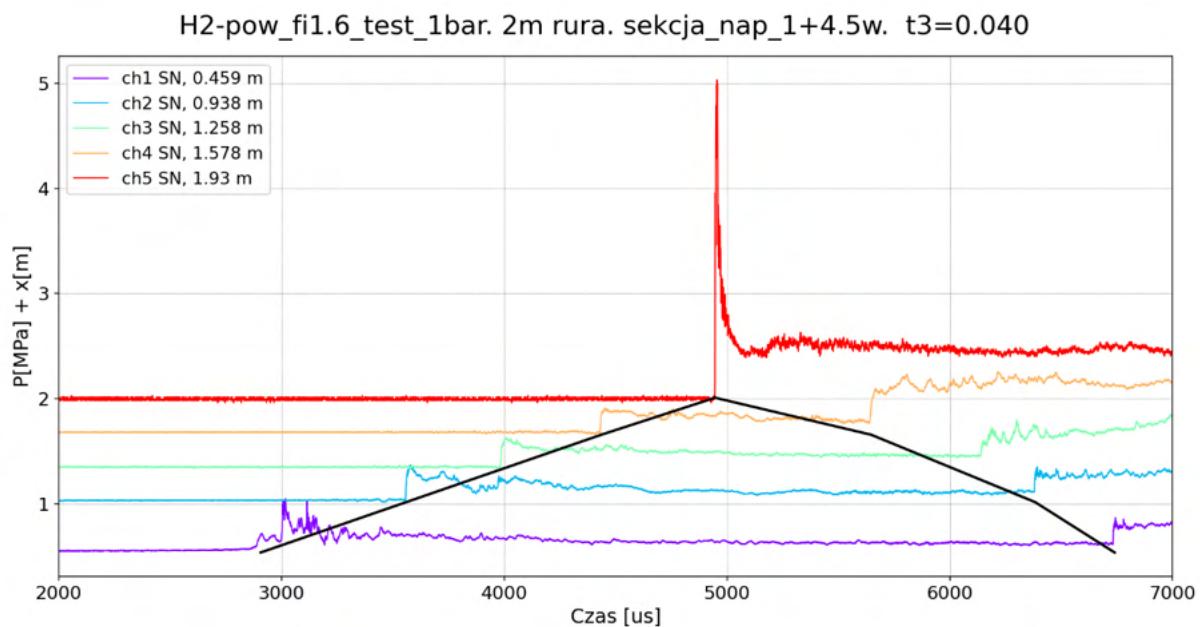
## Eksperyment 12.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



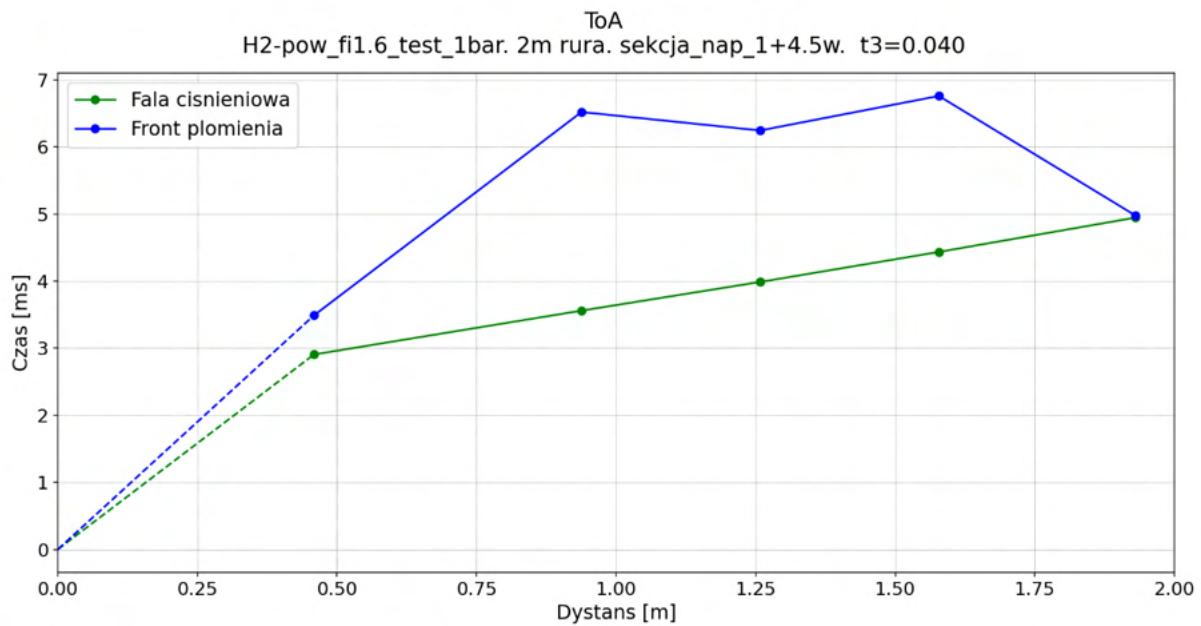
Rysunek 127 Eksperyment 12 ( $\Phi = 1,6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



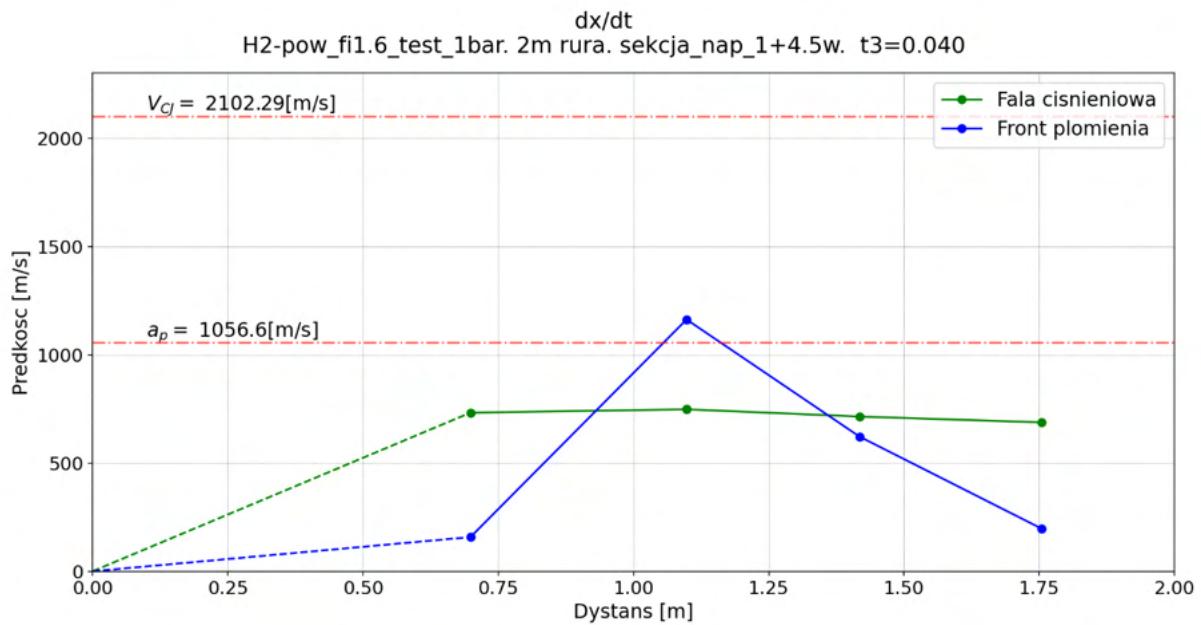
Rysunek 128 Eksperyment 12 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 129 Eksperyment 12 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

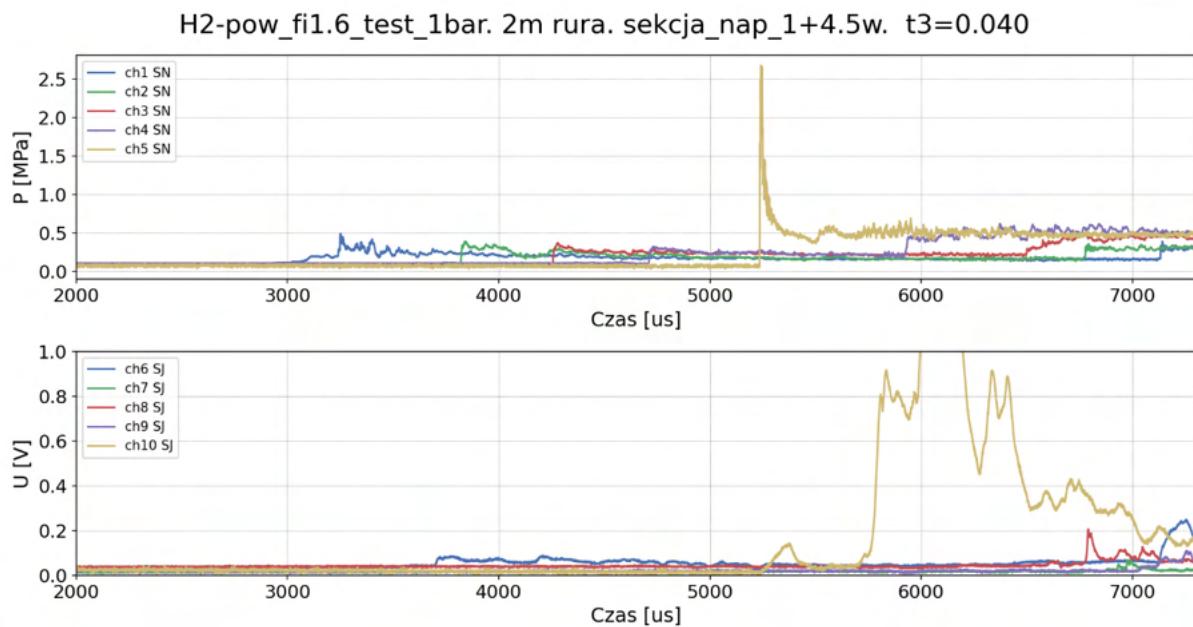


Rysunek 130 Eksperyment 12 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Wartość maksymalnego ciśnienia odnotowana w narożu wynosi 3,1 MPa. W przybliżeniu propagacja fali ciśnieniowej wzdłuż rury ze stałą prędkością, po odbiciu prędkość rośnie wraz z odległością. Prędkość frontu płomienia przekracza prędkość fali ciśnieniowej w położeniu ok. 1,1 m względem długości rury, następnie prędkość płomienia maleje. Odnotowany płomień wtórny w narożu oraz możliwe zwiększenie płomienia na sondzie nr 2. Opóźniony zapłon w narożu IDT = 32,5 us.

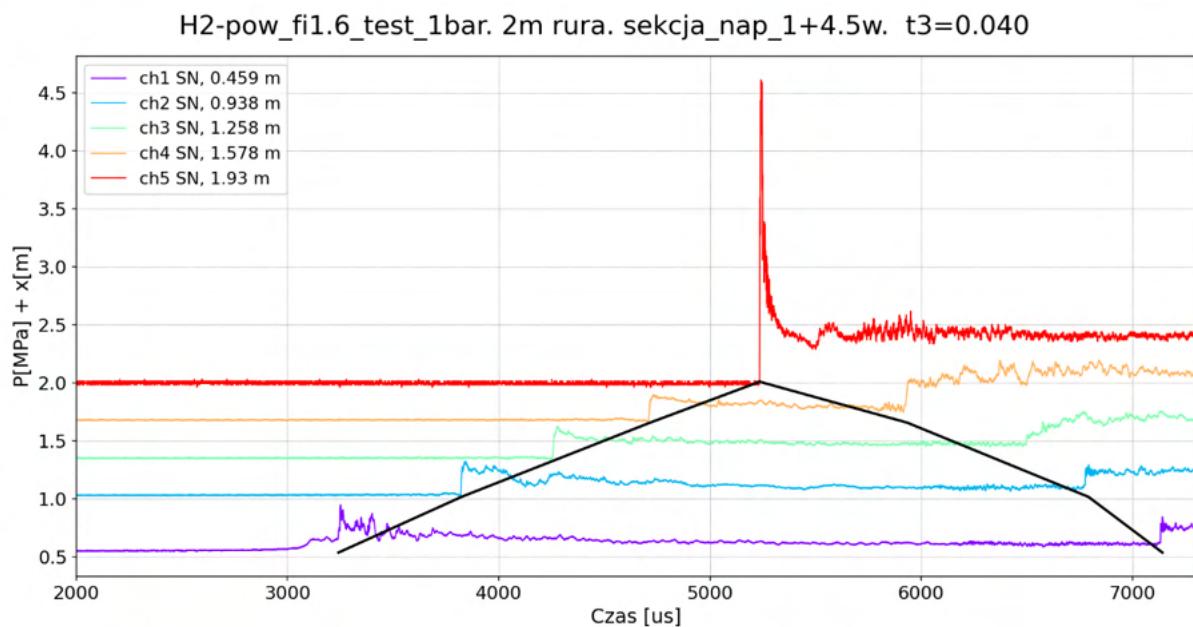
## Eksperyment 13.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



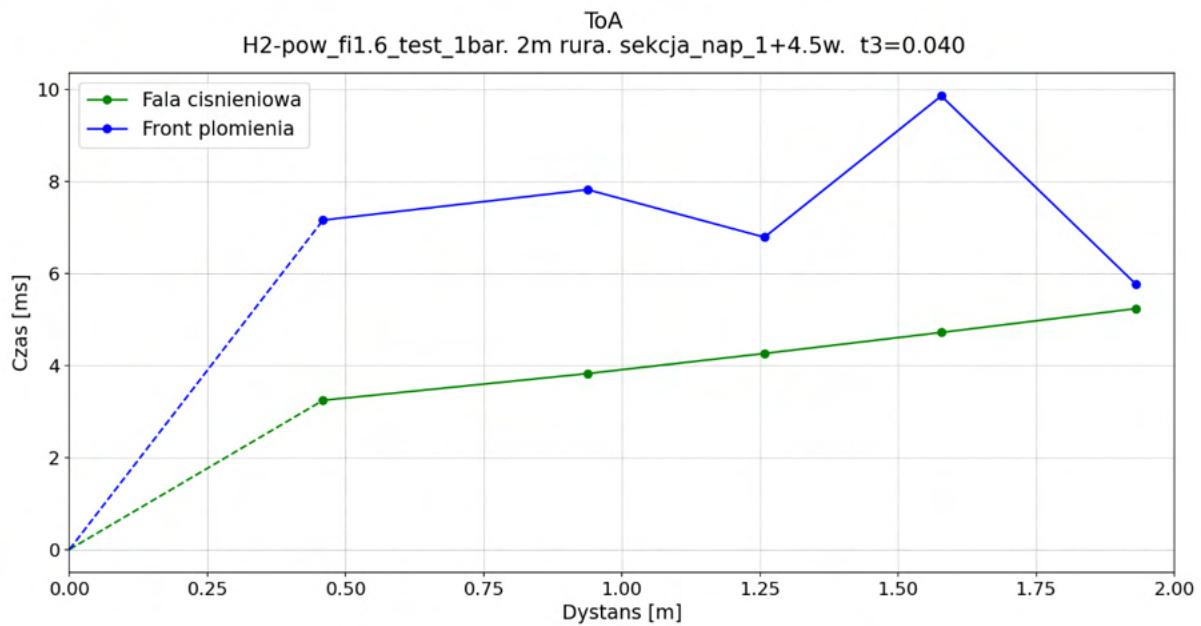
Rysunek 131 Eksperyment 13 ( $\Phi = 1,6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



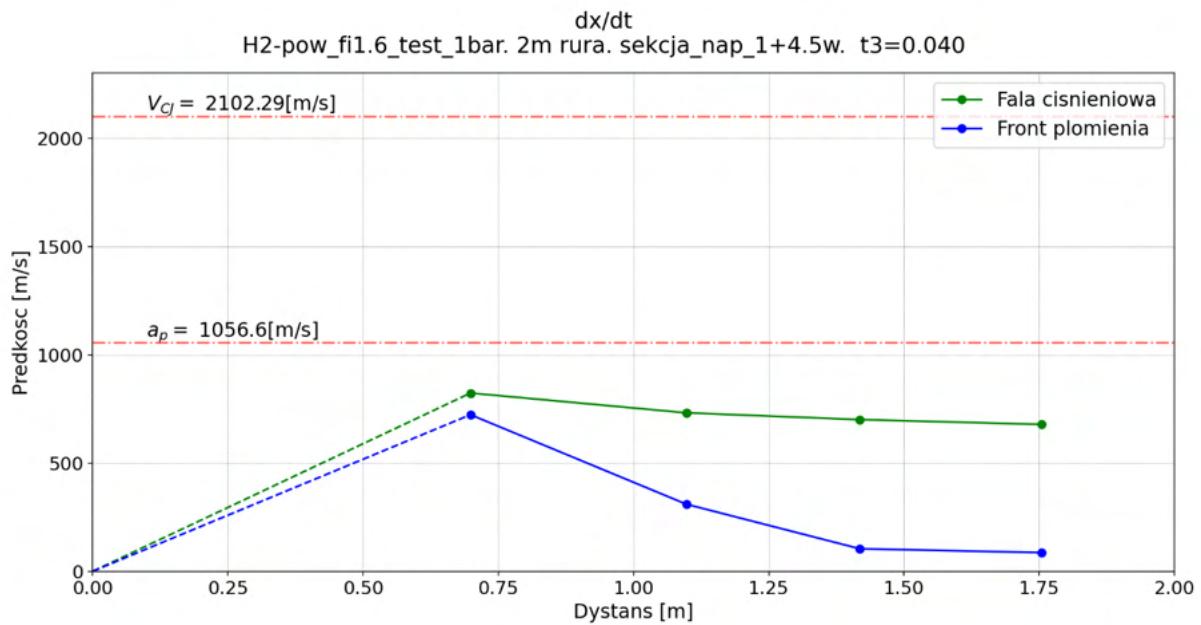
Rysunek 132 Eksperyment 13 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 133 Eksperyment 13 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

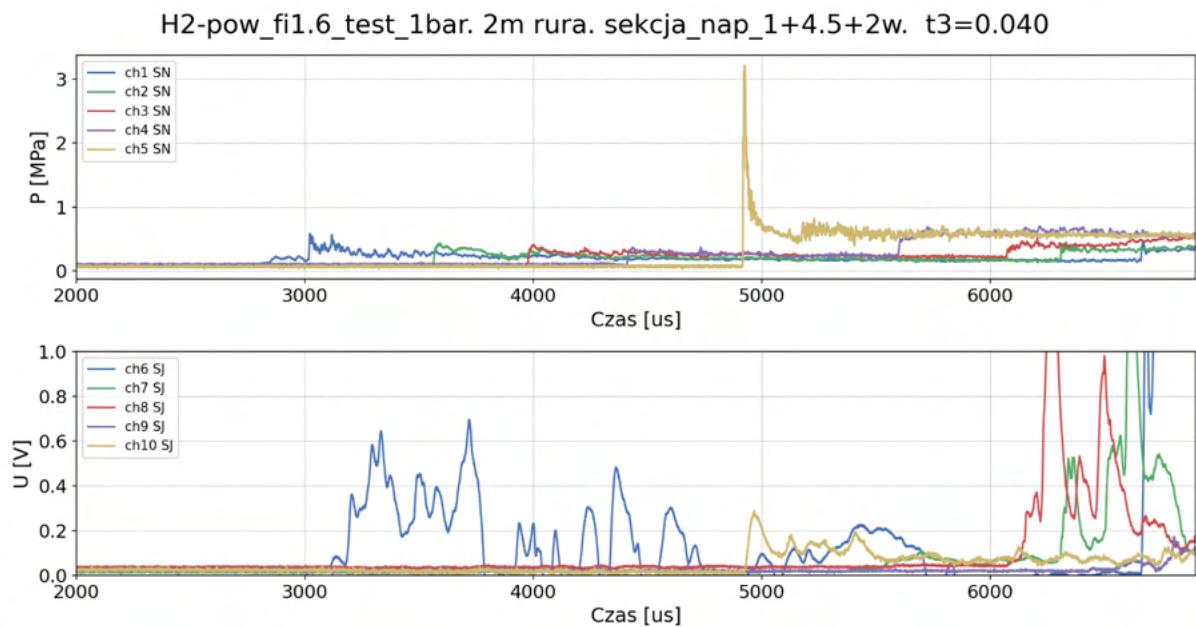


Rysunek 134 Eksperyment 13 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie maksymalne odnotowane w narożu równe 2,67 MPa. Prędkość fali ciśnieniowej stała w przybliżeniu, po odbiciu fala przyspiesza nierównomiernie wraz z odległością. Prędkość frontu płomienia rośnie maleje na całej długości rury. Zaobserwowano płomień wtórny w narożu oraz aktywację środkowej sondy pomiarowej, którą uznano za przedwczesną spowodowaną zniekształceniem płomienia przy ściankach. Opóźniony zapłon w narożu IDT = 533,5 us.

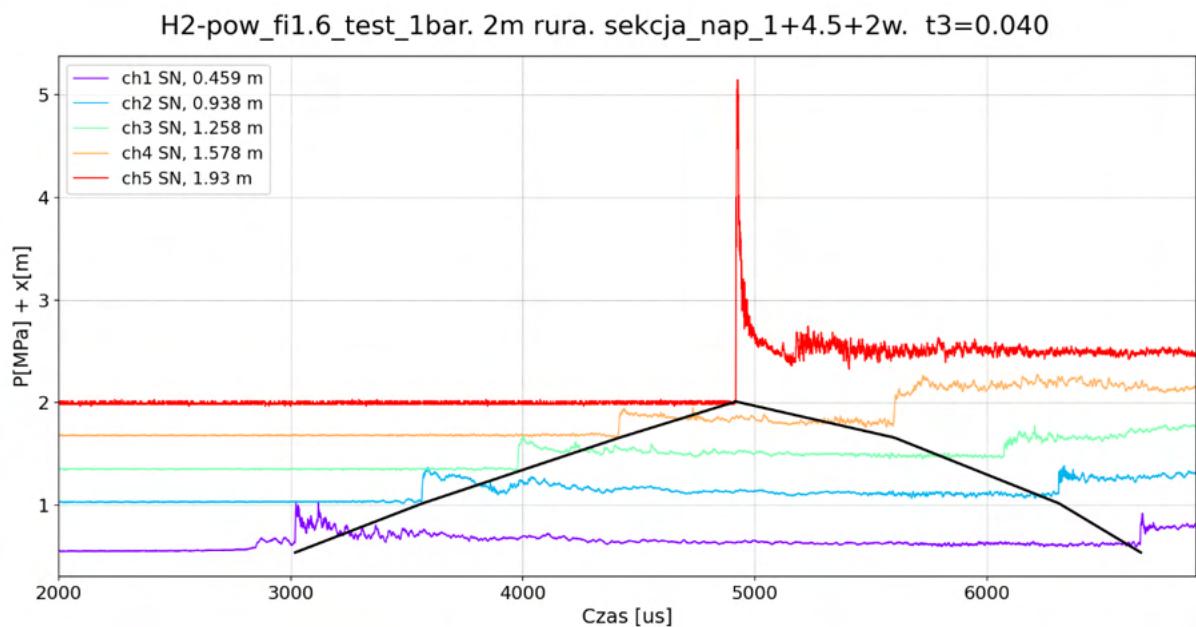
## Eksperyment 14.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



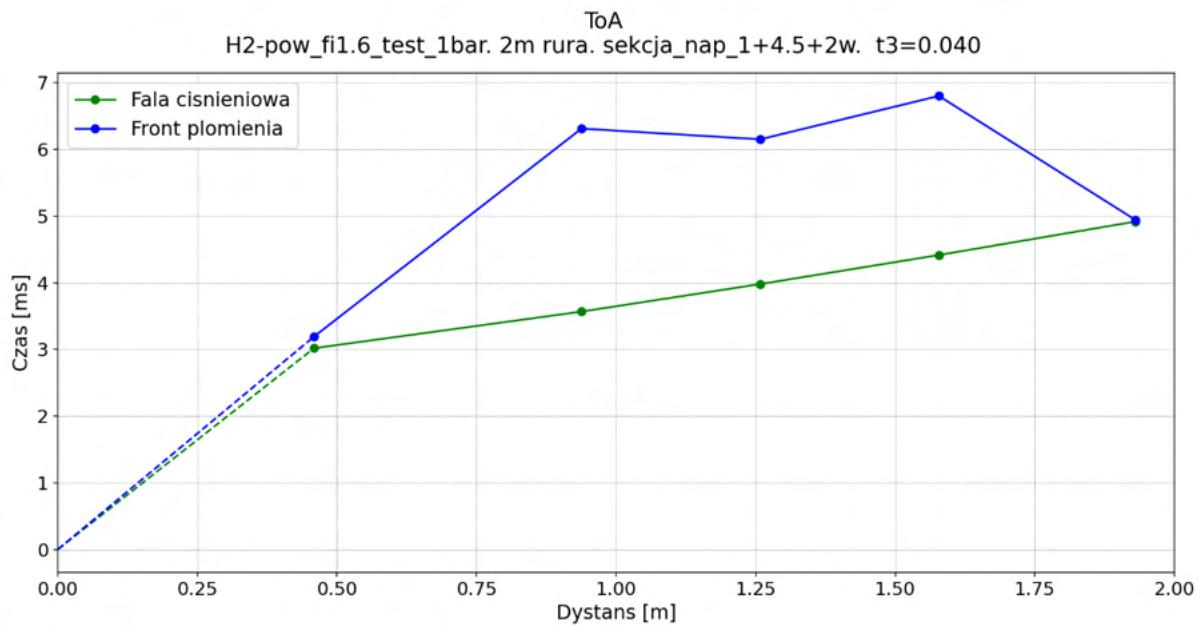
Rysunek 135 Eksperyment 14 ( $\Phi = 1,6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



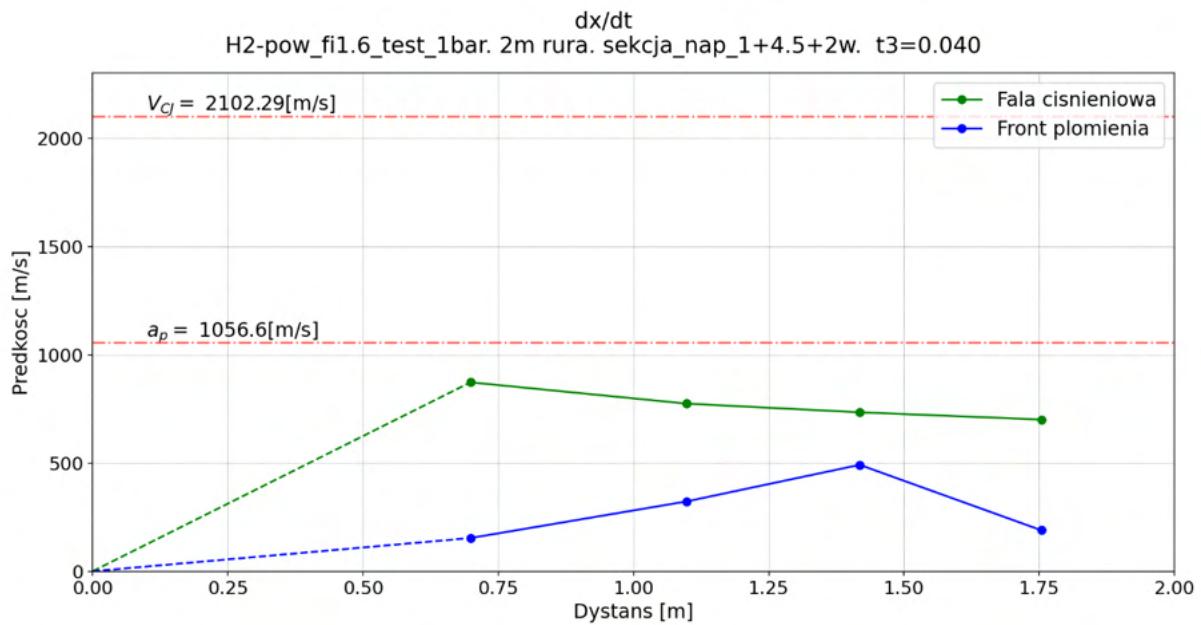
Rysunek 136 Eksperyment 14 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 137 Eksperyment 14 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

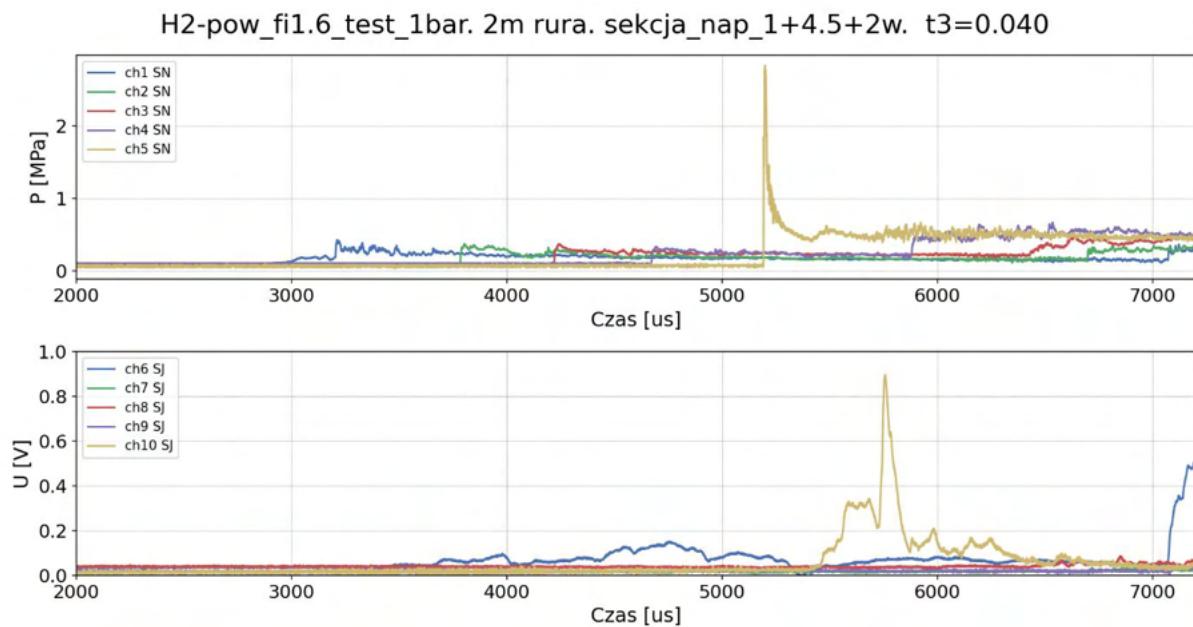


Rysunek 138 Eksperyment 14 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie maksymalne odnotowane w narożu równe 3,2 MPa. Fala ciśnieniowa o stałej w przybliżeniu prędkości wzdłuż rury, po odbiciu przyspieszenie fali wraz z odległością. Front płomienia z liniową prędkością rosnącą do ok 1,4 m długości rury, następnie front zwalnia. Zauważony płomień wtórny w narożu. Zadziałanie sondy środkowej wynikające ze zniekształconego płomienia przy ściankach kanału. Opóźniony zapłon w narożu IDT = 25,5 us.

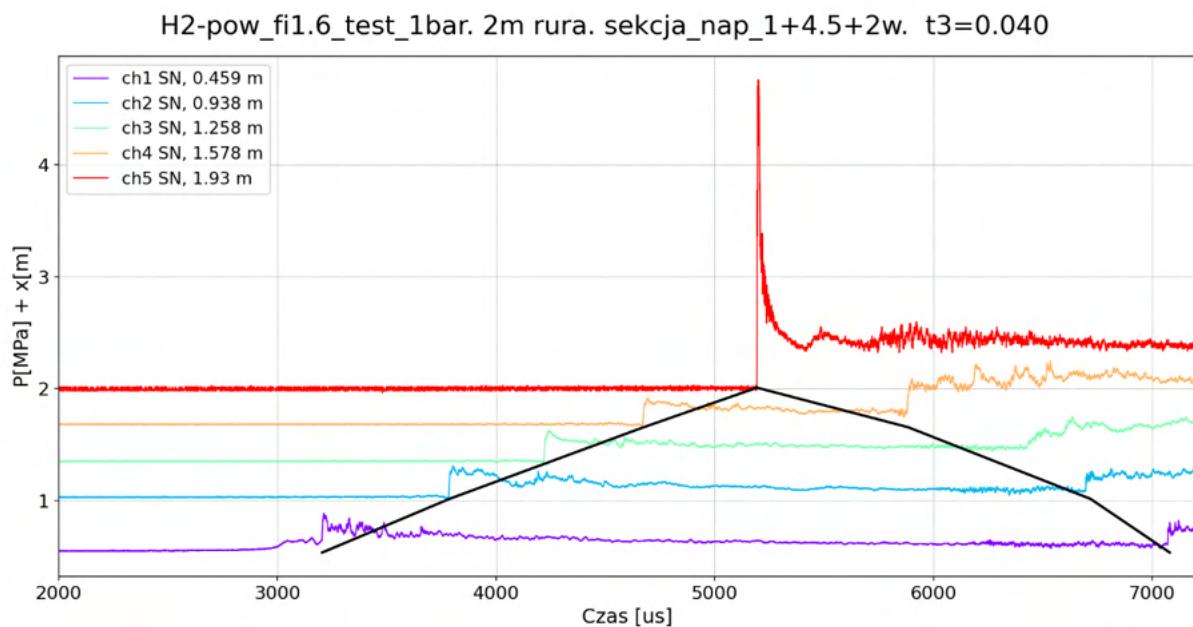
## Eksperyment 15.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



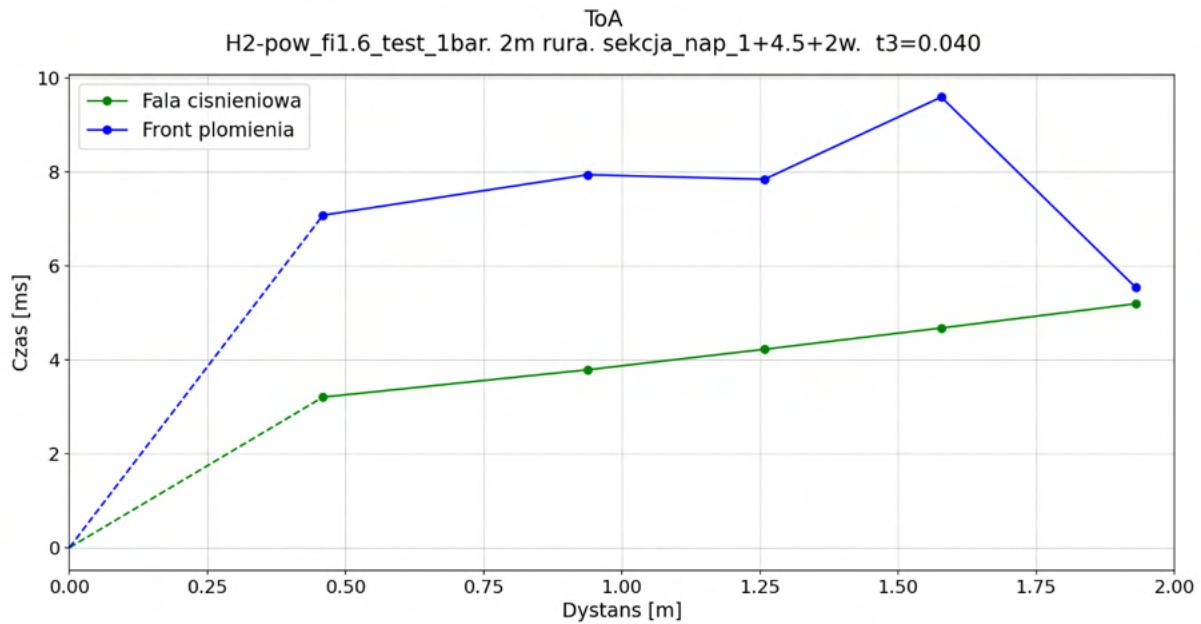
Rysunek 139 Eksperyment 15 ( $\Phi = 1,6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



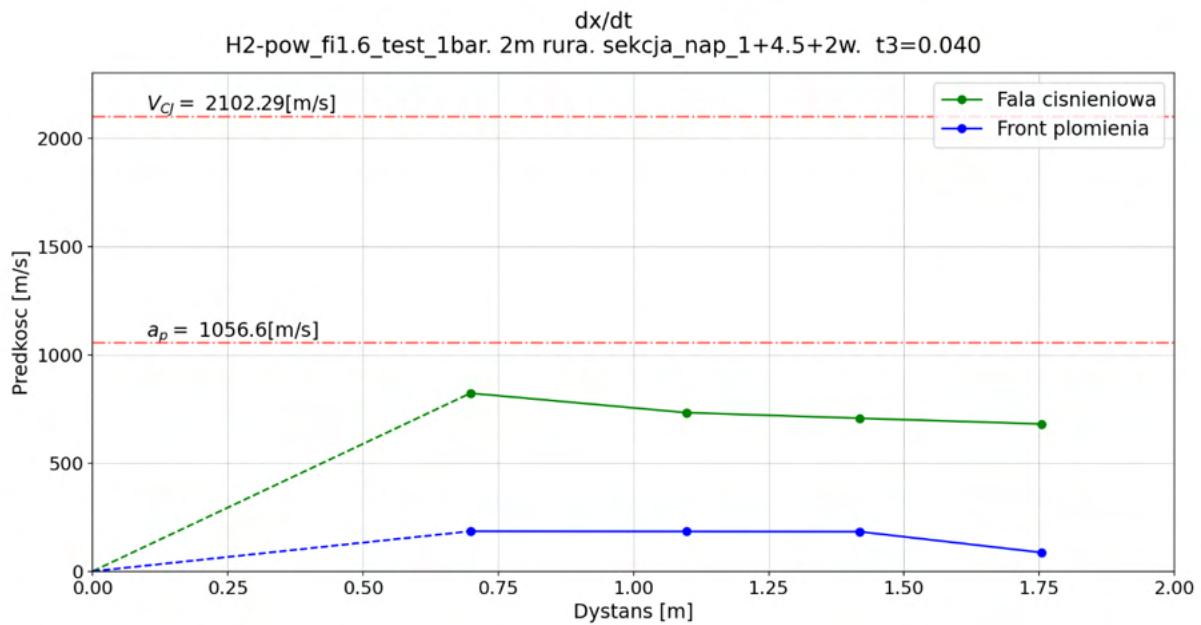
Rysunek 140 Eksperyment 15 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 141 Eksperyment 15 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

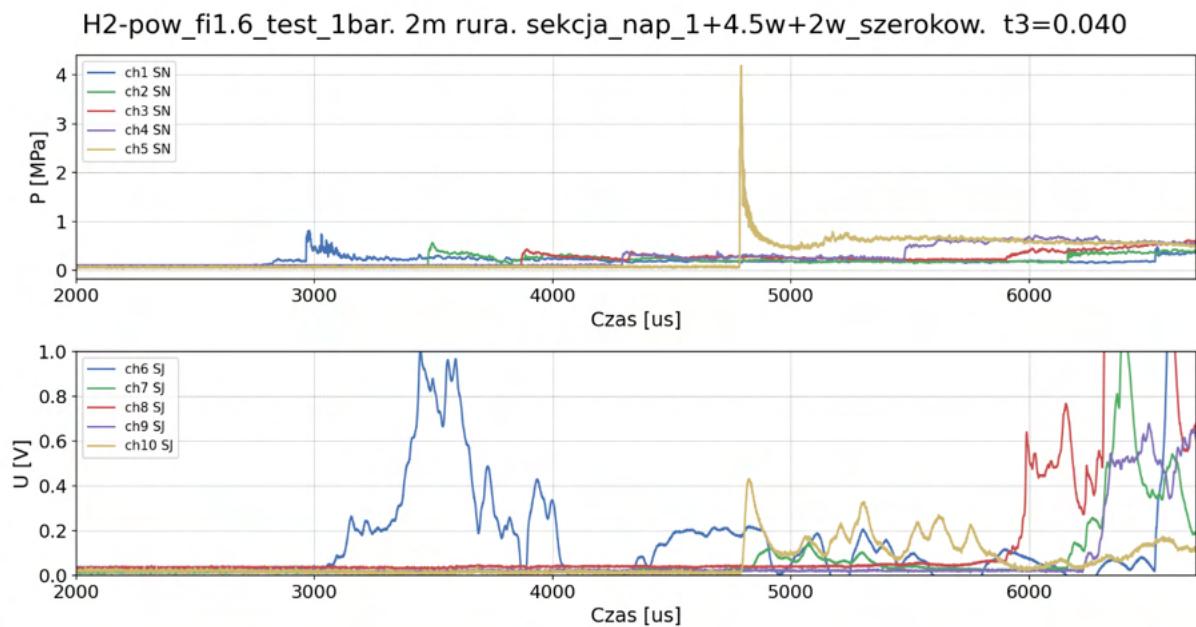


Rysunek 142 Eksperyment 15 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Maksymalne ciśnienie zarejestrowane w narożu o wartości 2,8 MPa. Płomień fali propagujący w przybliżeniu ze stałą prędkością wzdłuż kanału, po odbiciu fala wraca ze zbliżoną prędkością. Prędkość frontu płomienia w przybliżeniu stała wzdłuż rury, od ok. 1,4 m maleje. Zaobserwowano płomień wtórny w narożu oraz zniekształcenie płomienia przy ścianach wpływające na aktywację sond jonizacyjnych. Opóźniony zapłon w narożu IDT = 322,5 us.

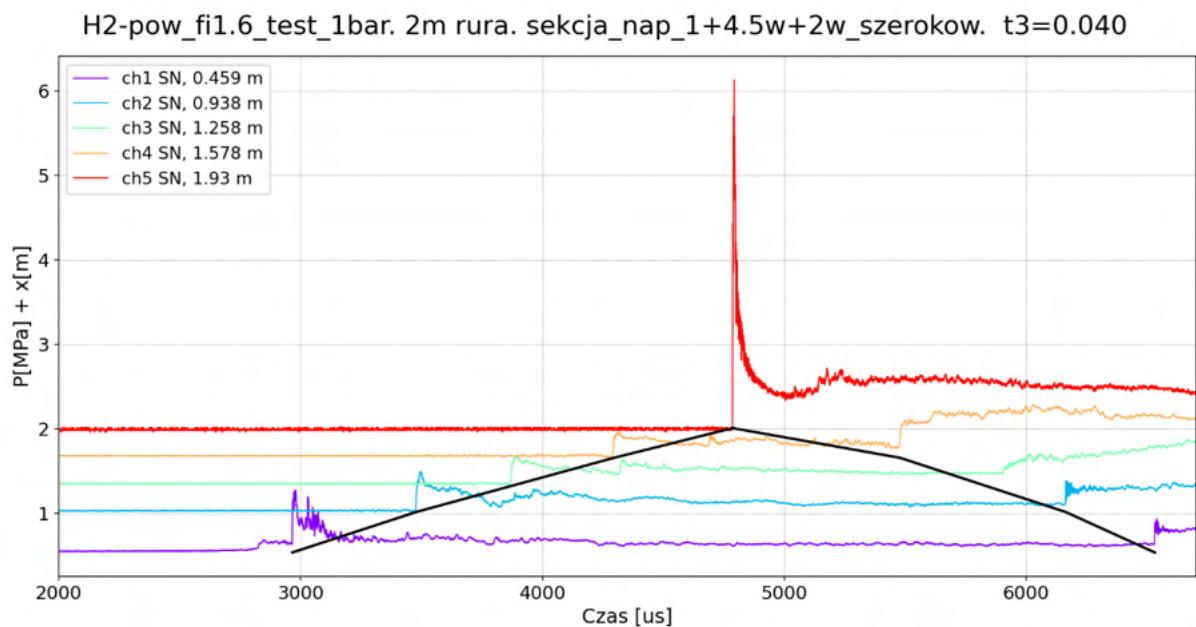
## Eksperyment 16.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



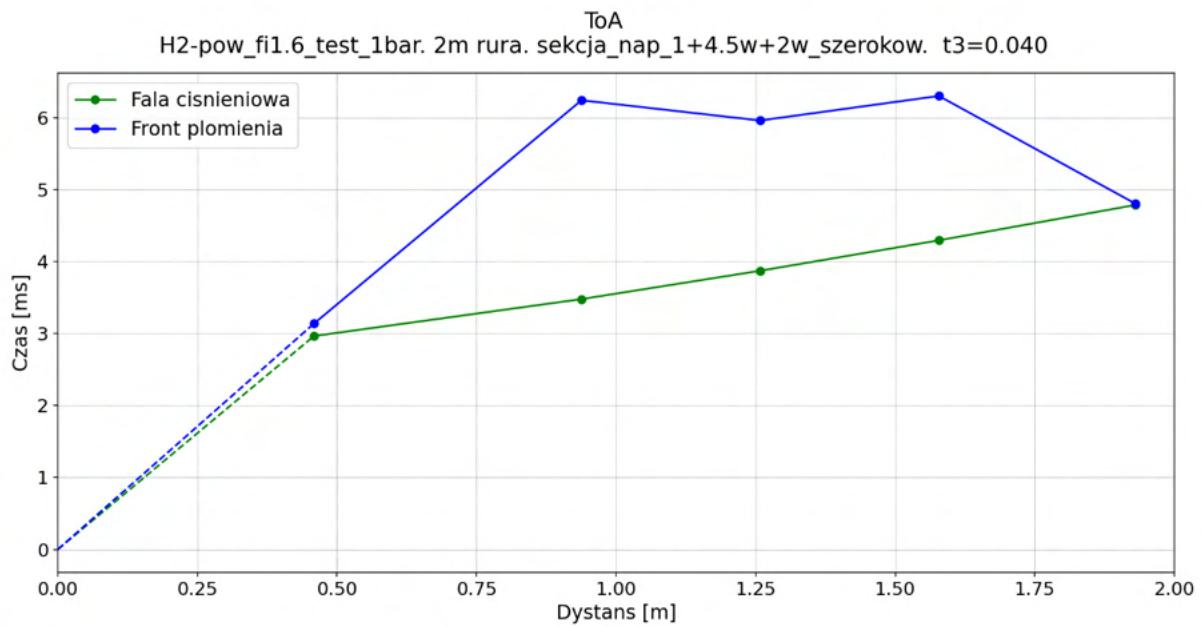
Rysunek 143 Eksperyment 16 ( $\Phi = 1,6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



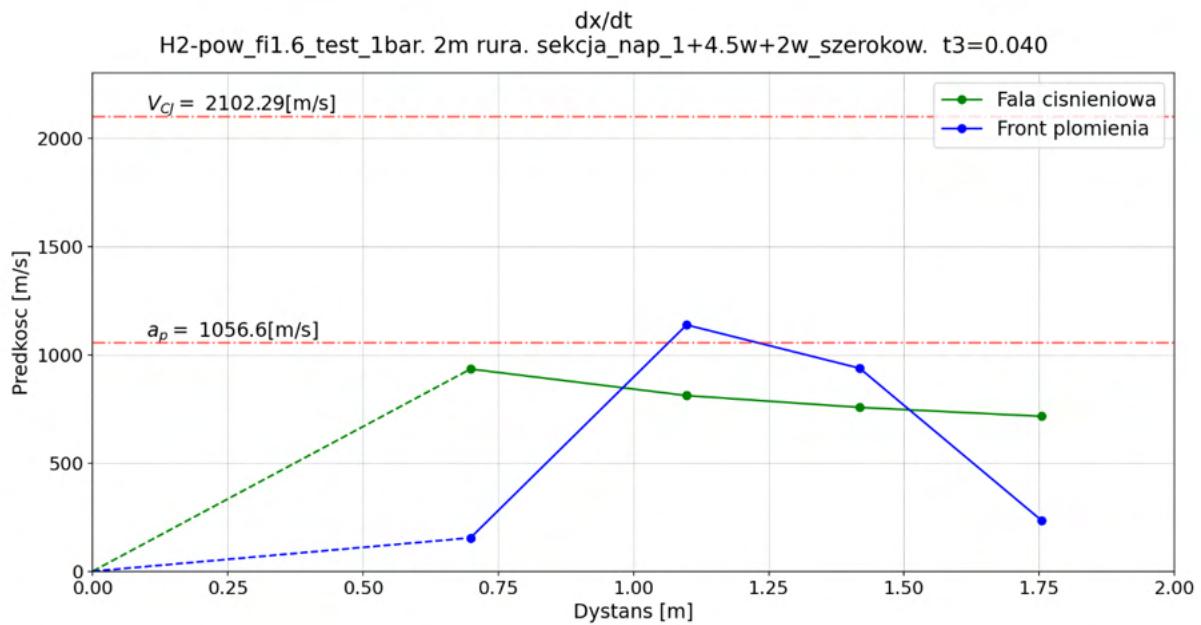
Rysunek 144 Eksperyment 16 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 145 Eksperyment 16 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:



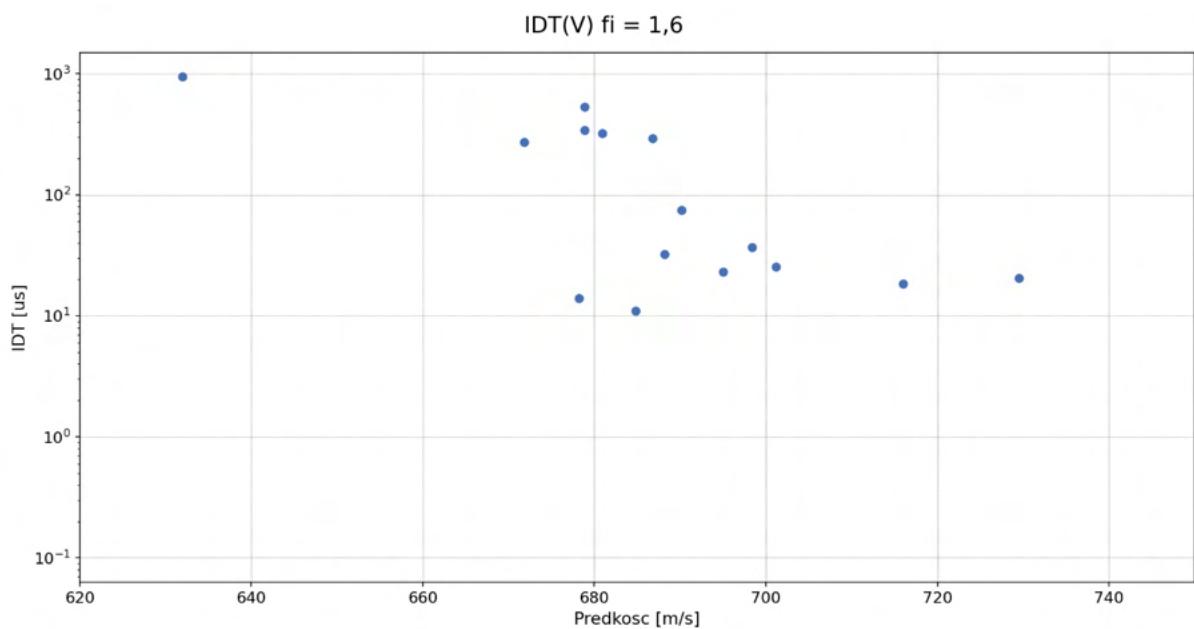
Rysunek 146 Eksperyment 16 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali cisnieniowej i frontu płomienia

Maksymalne ciśnienie w narożu o wartości 4,2 MPa. Propagacja płomienia w przybliżeniu ze stałą prędkością wzdłuż rury, po odbiciu fala wraca z prędkością rosnącą wzdłuż odległości. Zaobserwowano płomień w narożu. Pomiar sondy środkowej można tłumaczyć zniekształconym płomieniem na ścianach kanału. Front płomienia przyspiesza do ok. 1,1 m długości rury do prędkości większej niż prędkość dźwięku spalin, następnie zwalnia. Opóźniony zapłon w narożu IDT = 18,5 us.

Tabela 6 zestawienie wyników eksperymentów mieszaniny  $\phi = 1,6$ 

Nr eksperymentu	Prędkość fali w chwili uderzenia w naroże [m/s]	Czas opóźnienia zapłonu [us]	Czy doszło do detonacji	Czy zaszła deflagracja	Ciśnienie w narożu w momencie uderzenia fali [MPa]
1	2120,5	1	tak (przedwczesna)	nie	19,6
2	632	945	nie	tak	2,0
3	678,2	14	nie	tak	4,1
4	684,8	11	nie	tak	4,0
5	671,8	271	nie	tak	3,3
6	678,9	342,5	nie	tak	2,7
7	729,5	20,5	nie	tak	4,1
8	698,4	37	nie	tak	3,2
9	695	23	nie	tak	3,2
10	690,2	75	nie	tak	2,9
11	686,8	294,5	nie	tak	2,72
12	688,2	32,5	nie	tak	3,1
13	678,9	533,5	nie	tak	2,67
14	701,2	25,5	nie	tak	3,2
15	680,9	322,5	nie	tak	2,8
16	716	18,5	nie	tak	4,2

Po przeprowadzeniu 16 eksperymentów dla mieszaniny o stężeniu 40% można wyciągnąć następujące wnioski. Nie zarejestrowano przejścia do detonacji w narożu. Minimalna prędkość fali ciśnieniowej w chwili uderzenia w naroże, dla której zarejestrowano opóźniony zapłon wynosi 632 m/s (IDT = 945 us). Najwyższa odnotowana prędkość fali wynosi 729,5 m/s (IDT = 20,5). Ciśnienia w zakresie 2,0-4,2 MPa. Zaobserwowano przedwczesne przejście do detonacji (eksperyment 1) o prędkości 2120,5 m/s oraz ciśnieniu w narożu o wartości 19,6 MPa.



Rysunek 147 Wykres opóźnienia zapłonu w funkcji prędkości fali ciśnieniowej ( $\Phi = 1,6$ )

Na podstawie wykresu można wyróżnić trzy kategorie punktów. Pierwsza grupa dla IDT o wartościach 10 - 80 us (prędkość fali ciśnieniowej powyżej 675 m/s), dla kolejnej grupy punktów IDT w zakresie 250-550 us (prędkość fali ciśnieniowej w zakresie 670-687 m/s), ostatnia grupa powyżej 900 us (prędkości fali ciśnieniowej poniżej 635 m/s).

### 5.3 Badanie mieszaniny o współczynniku ekwiwalencji $\Phi = 0,8$

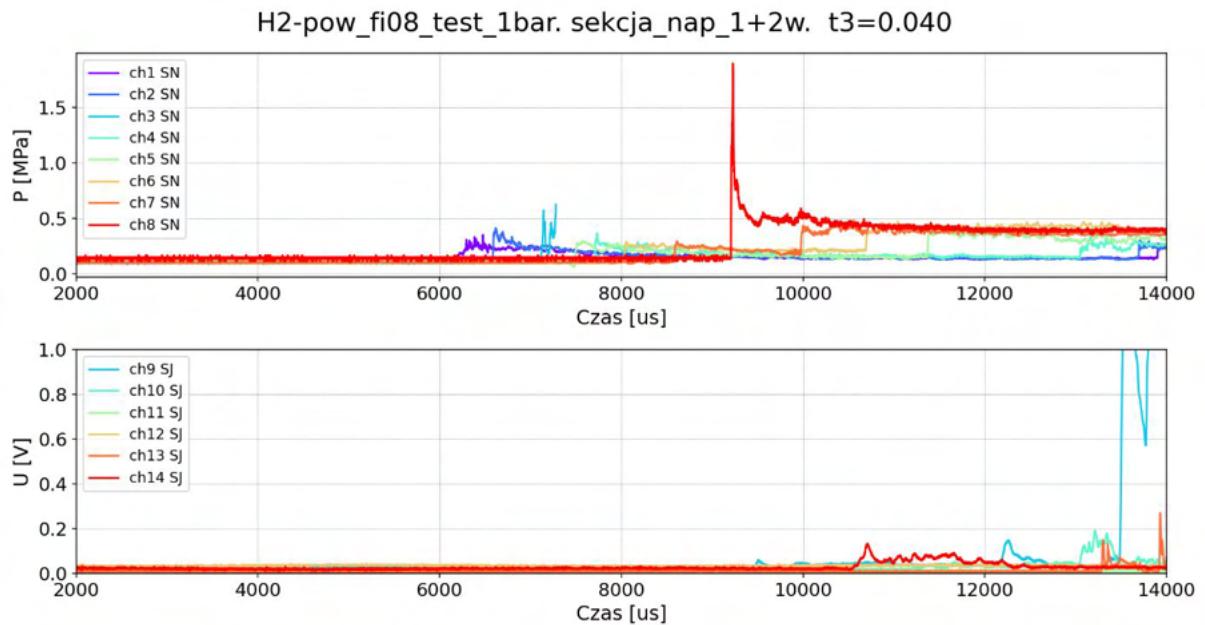
Następną przebadaną mieszanką paliwowo-powietrzną jest mieszanina wodorowo-powietrzna o zawartości wodoru równej 25% ( $\Phi = 0,8$ ). Wykonano 8 eksperymentów powyższej mieszaniny. Wyniki zaprezentowano poniżej.

Tabela 7 konfiguracje sekcji napędzającej mieszaniny  $\Phi = 0,8$

Konfiguracja 1 stanowiska badawczego	
Eksperyment 1	1 człon sekcji + 2 warstwy
Eksperyment 2	1 człon sekcji + 5 warstw
Eksperyment 3	1 człon sekcji + 10 warstw
Eksperyment 4	1 człon sekcji + 7 warstw
Eksperyment 5	1 człon sekcji + 2 warstwy
Eksperyment 6	1 człon sekcji – 0,5 warstwy
Eksperyment 7	1 człon sekcji
Eksperyment 8	1 człon sekcji + 1 warstwa

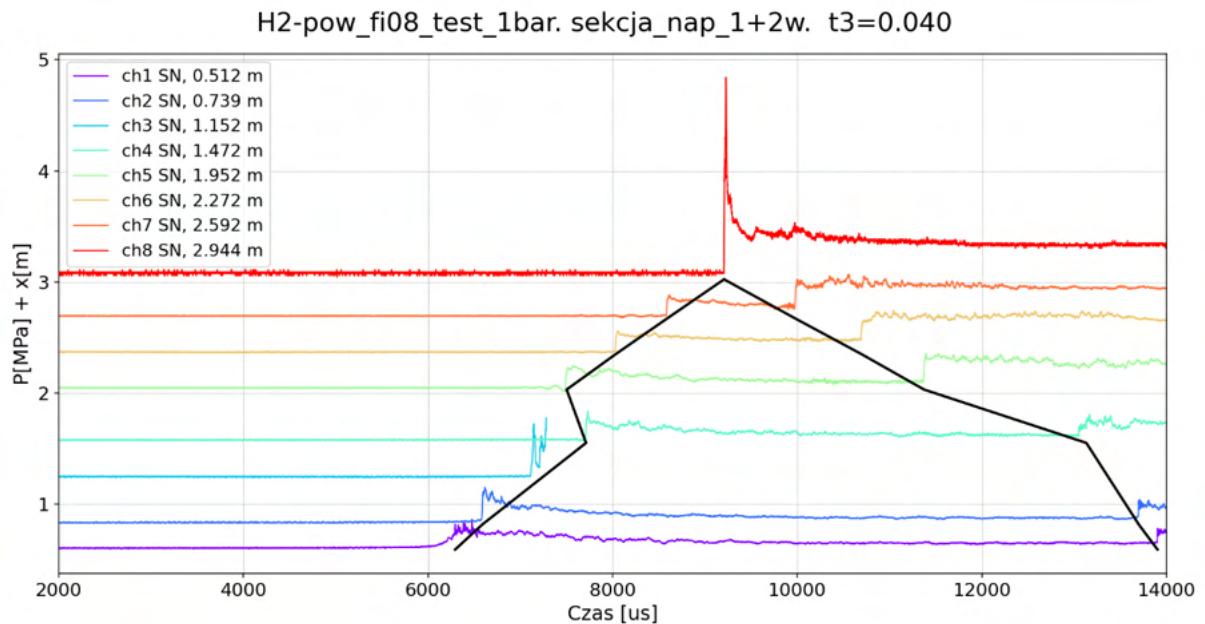
## Eksperyment 1.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



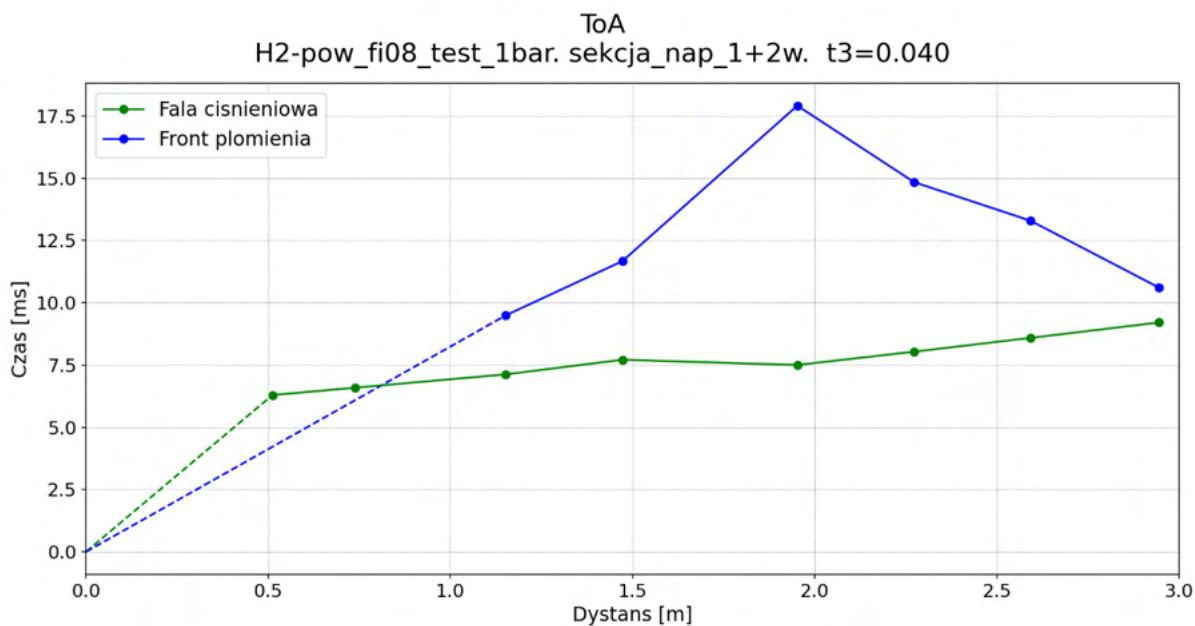
Rysunek 148 Eksperyment 1 ( $\Phi = 0,8$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



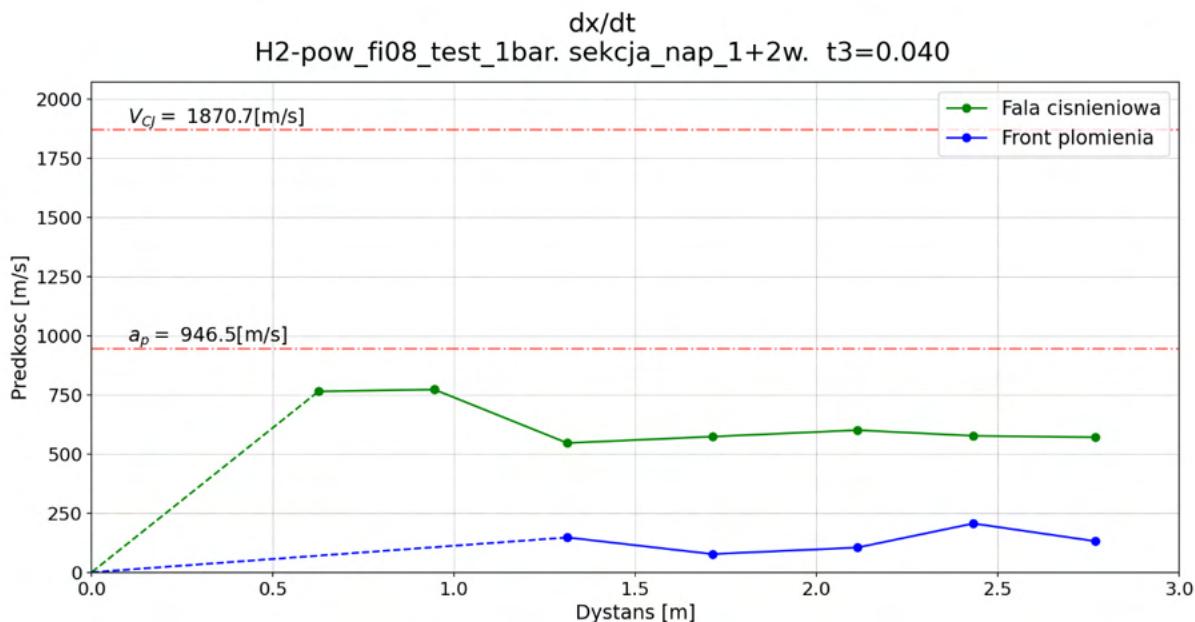
Rysunek 149 Eksperyment 1 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 150 Eksperyment 1 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

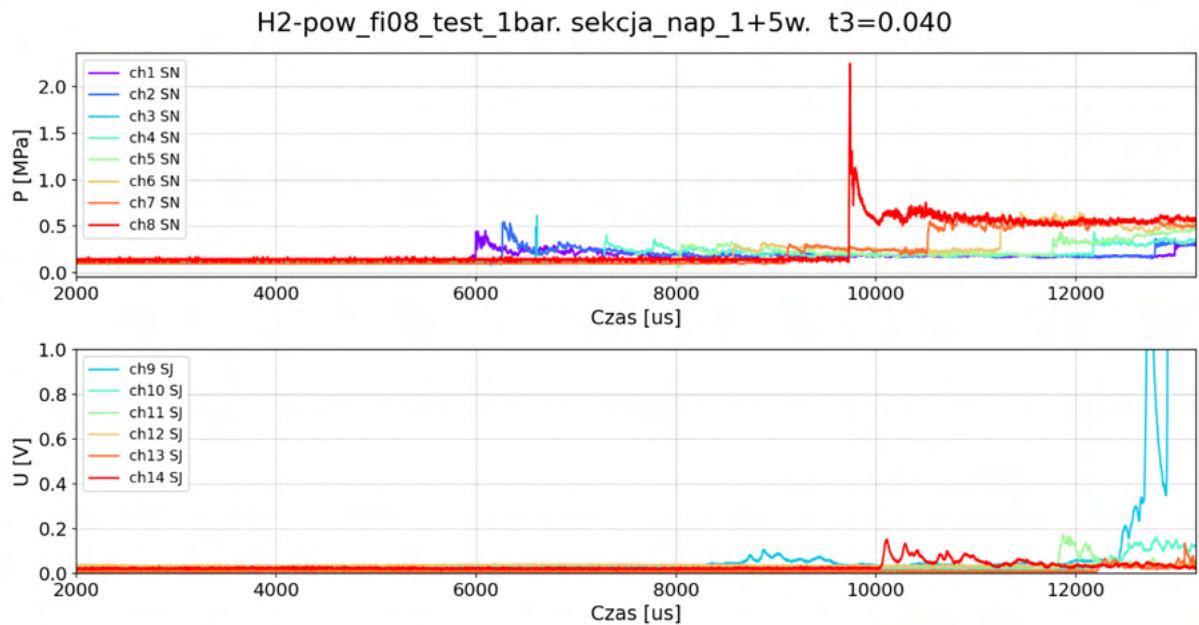


Rysunek 151 Eksperyment 1 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Maksymalne ciśnienie o wartości 1,9 MPa. Słabe pomiary parametrów na sondach jonizacyjnych. Zarejestrowano nierzeczywisty przebieg fali ciśnieniowej, najprawdopodobniej spowodowany błędem czujników. Prędkość płomienia w przybliżeniu stała na całej długości kanału. Zaobserwowano płomień wtóry powstały w narożu, który propaguje w stronę płomienia pierwotnego. Opóźniony zapłon w narożu IDT = 1404 us.

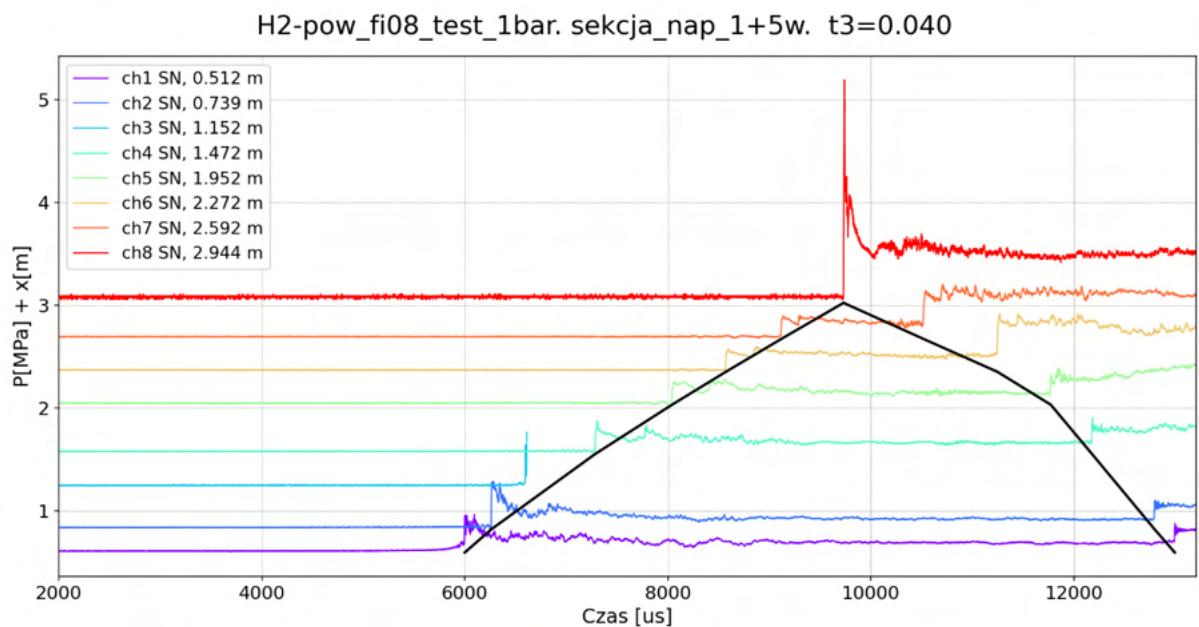
## Eksperyment 2.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



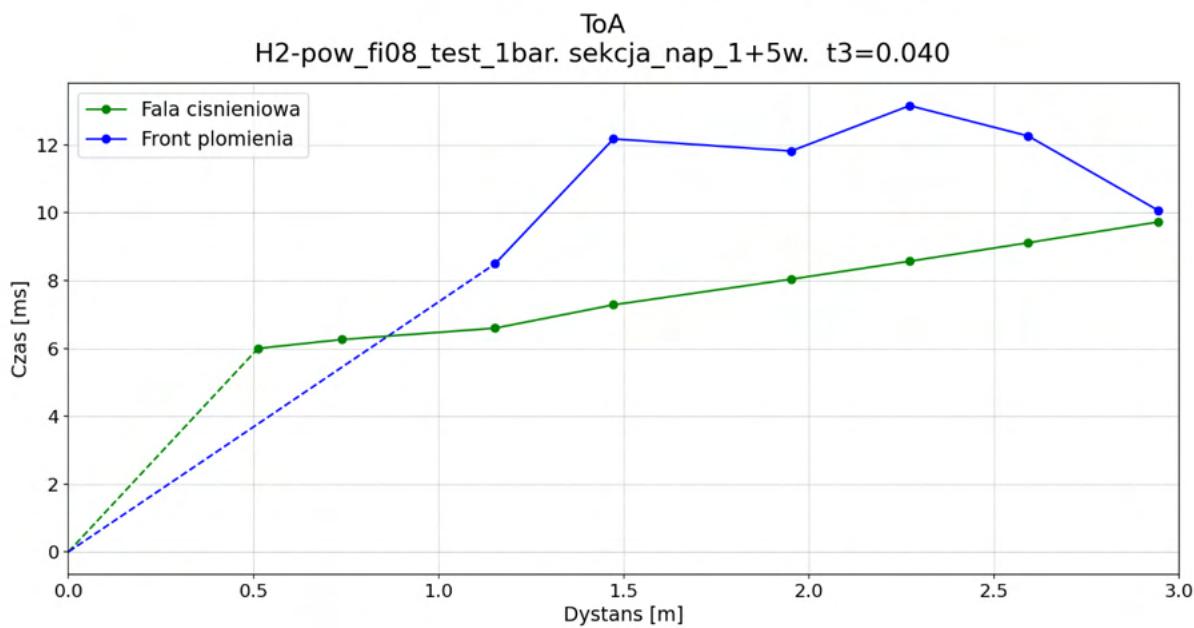
Rysunek 152 Eksperyment 2 ( $\Phi = 0,8$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



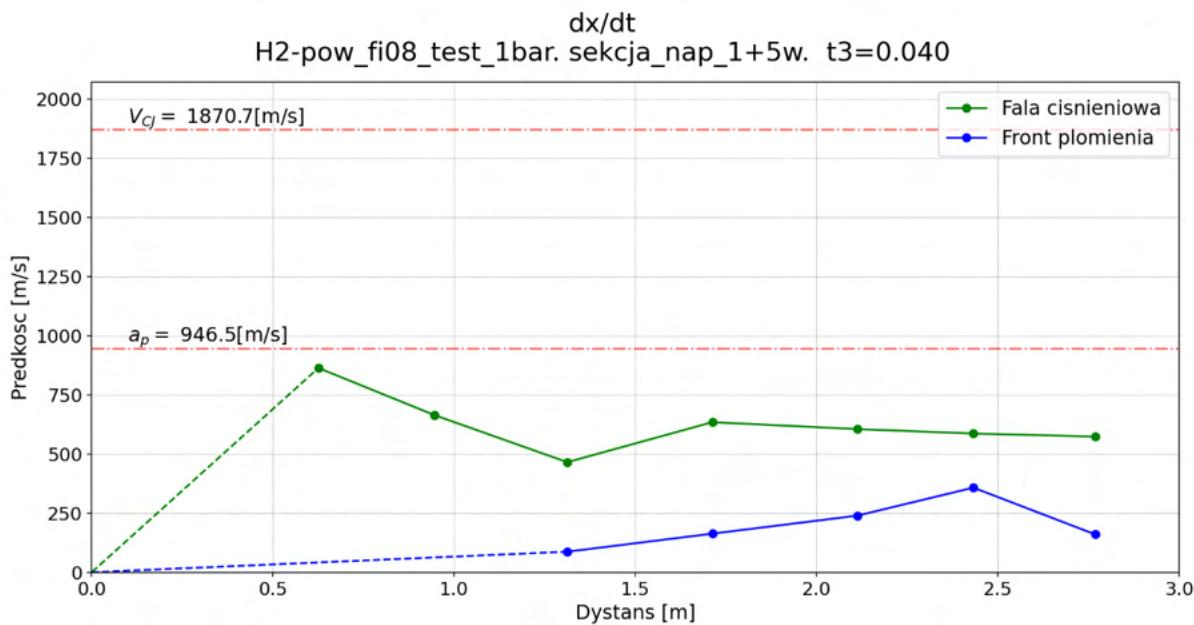
Rysunek 153 Eksperyment 2 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 154 Eksperyment 2 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

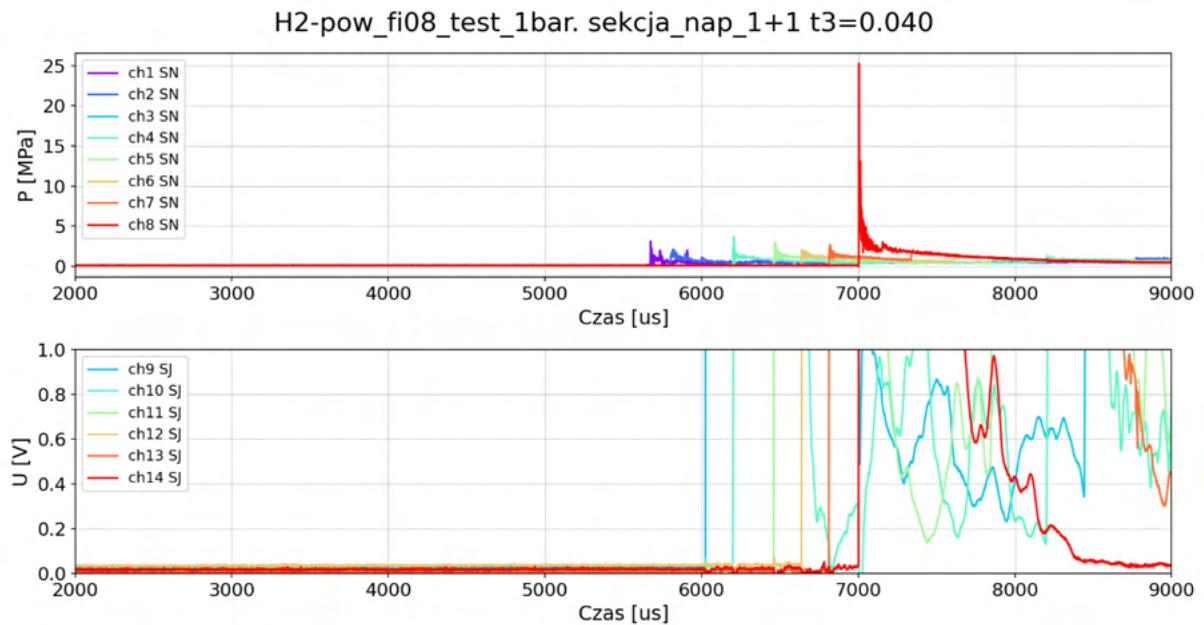


Rysunek 155 Eksperyment 2 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie maksymalne powstałe w narożu o wartości 2,3 MPa. Słabe pomiary napięcia na sondach jonizacyjnych. W przybliżeniu stała prędkość propagacji fali ciśnieniowej wzdłuż kanału, po odbiciu fala przyspiesza wraz z odległością. Zaobserwowano drugi płomień powstały w narożu i propagujący w stronę sekcji napędzającej oraz możliwe zniekształcenie płomienia na ściankach przy sondzie nr 3. Prędkość płomienia w przybliżeniu rośnie do ok. 1,1 m długości rury, następnie maleje. Opóźniony zapłon w narożu IDT = 333 us.

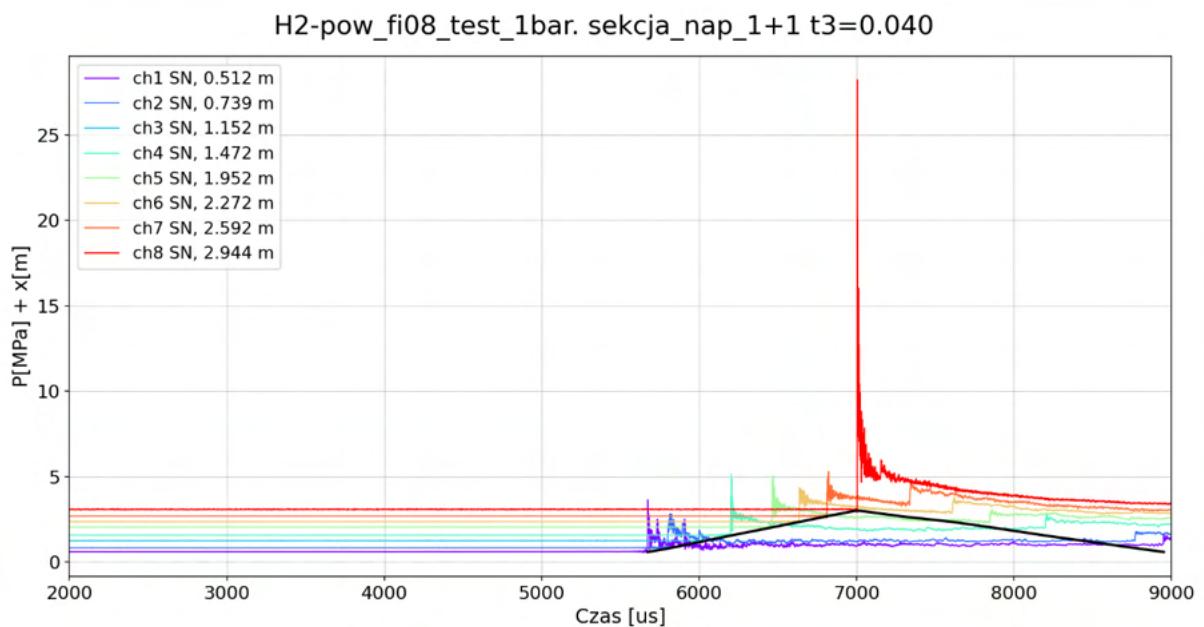
### Eksperyment 3.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



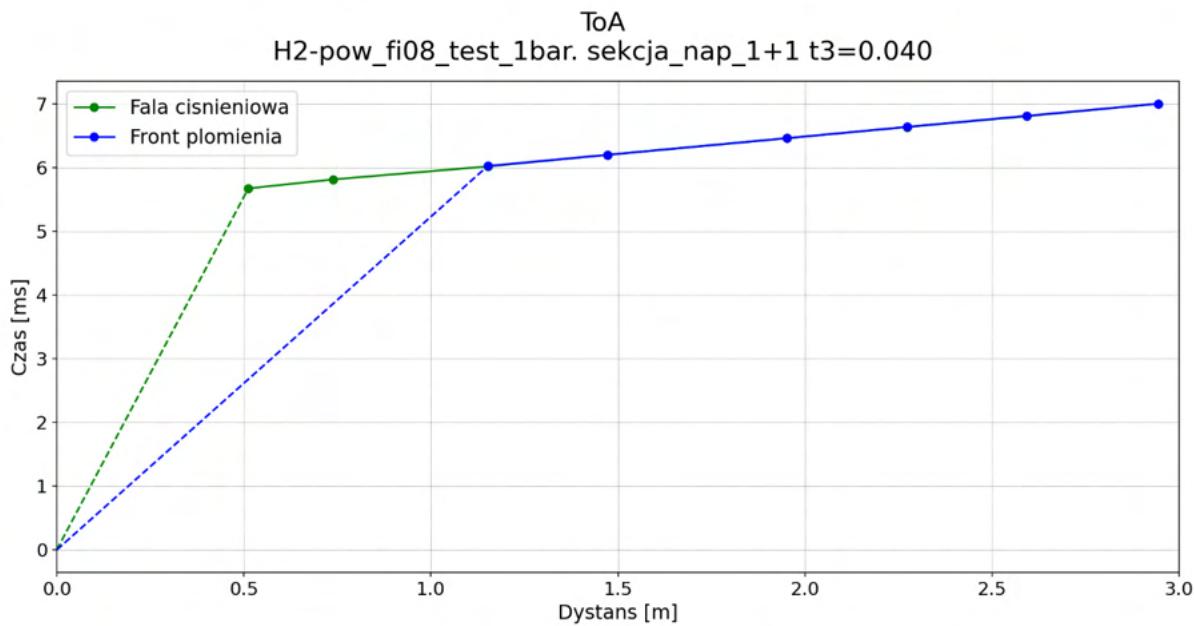
Rysunek 156 Eksperyment 3 ( $\Phi = 0,8$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



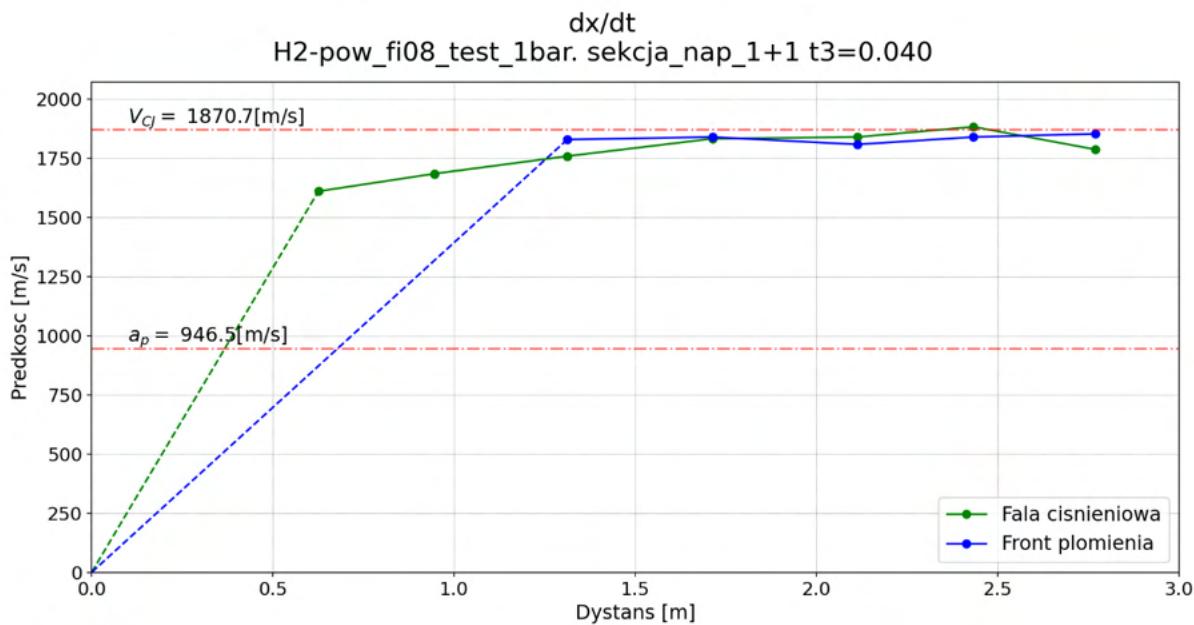
Rysunek 157 Eksperyment 3 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 158 Eksperyment 3 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

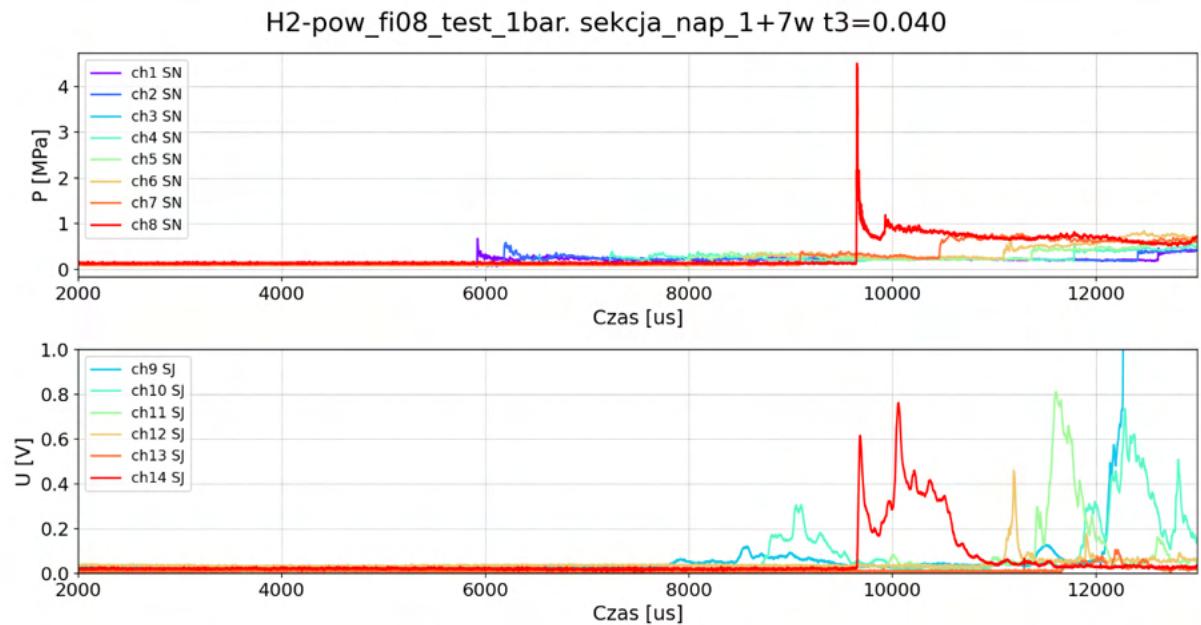


Rysunek 159 Eksperyment 3 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie maksymalne zarejestrowane w narożu o wartości 25,2 MPa. Front płomienia dogania falę w odległości ok. 1,1 m wzdłuż rury. Zaobserwowana detonacja w sekcji badawczej IDT = 1 us. Prędkość detonacji w chwili uderzenia w naroże równa w przybliżeniu 1786,8 m/s.

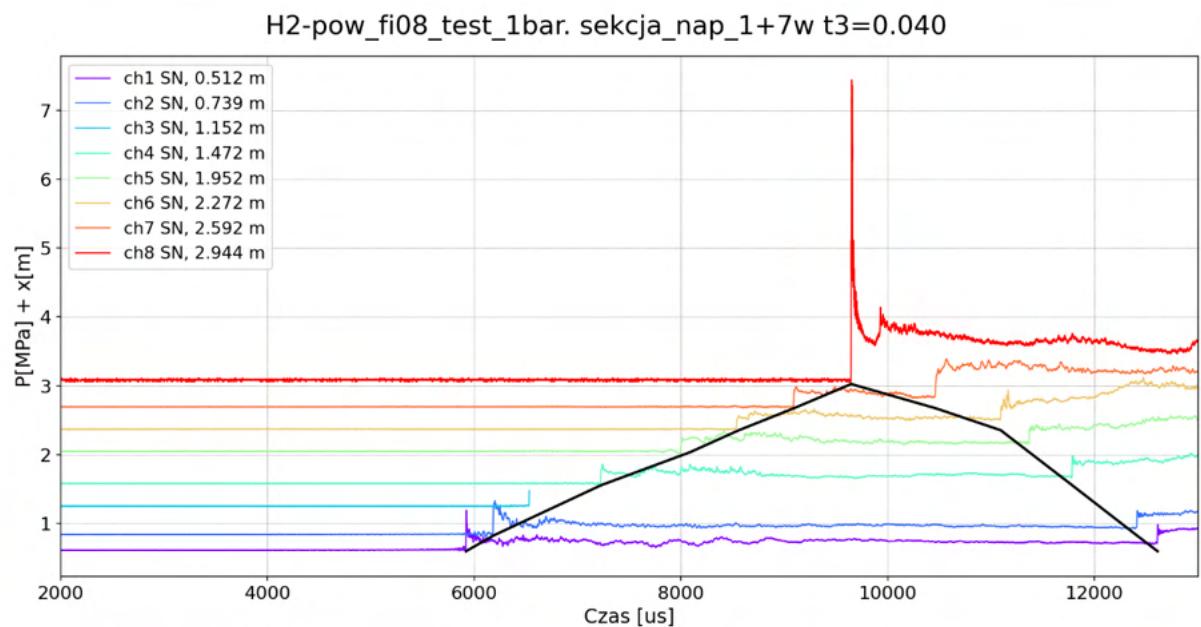
## Eksperyment 4.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



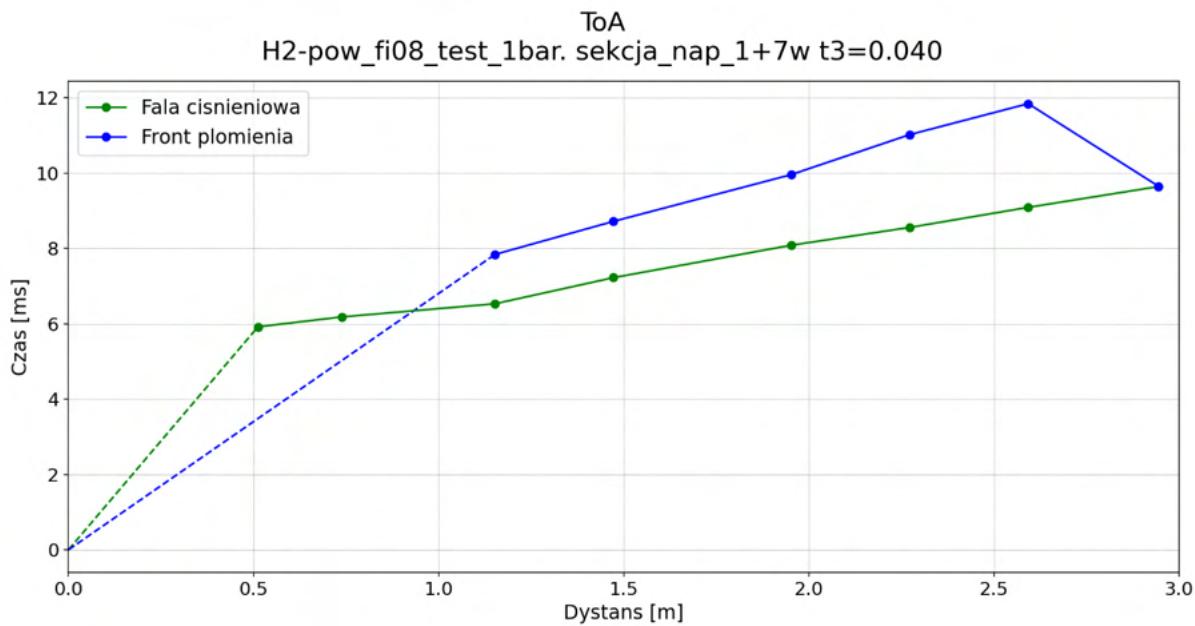
Rysunek 160 Eksperyment 4 ( $\Phi = 0,8$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



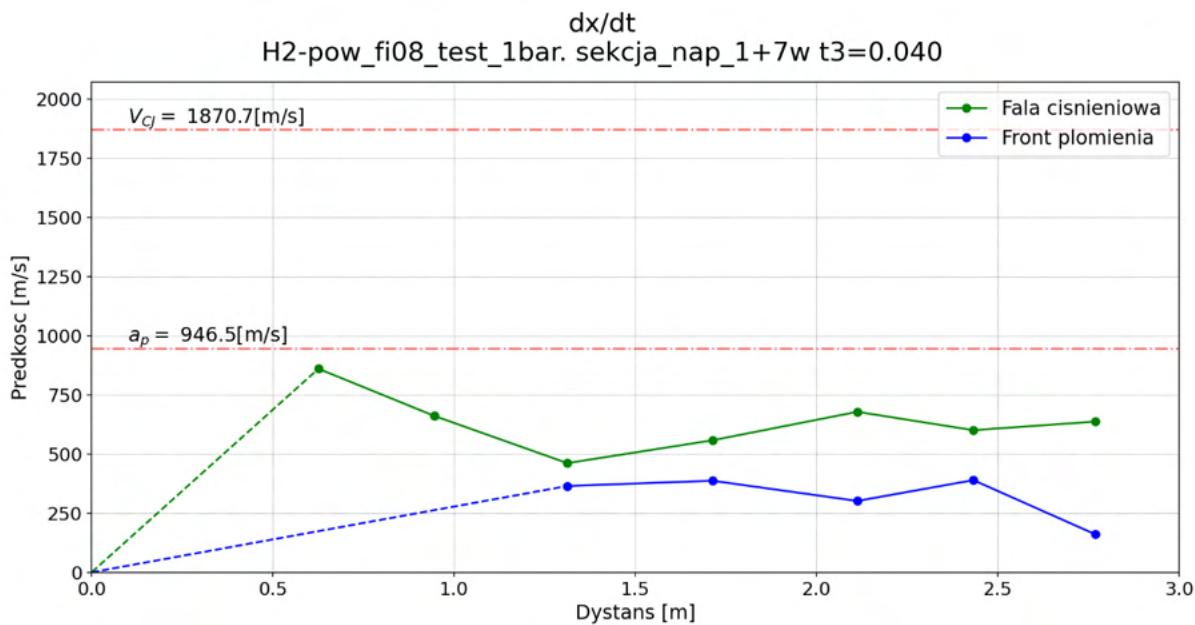
Rysunek 161 Eksperyment 4 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 162 Eksperyment 4 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

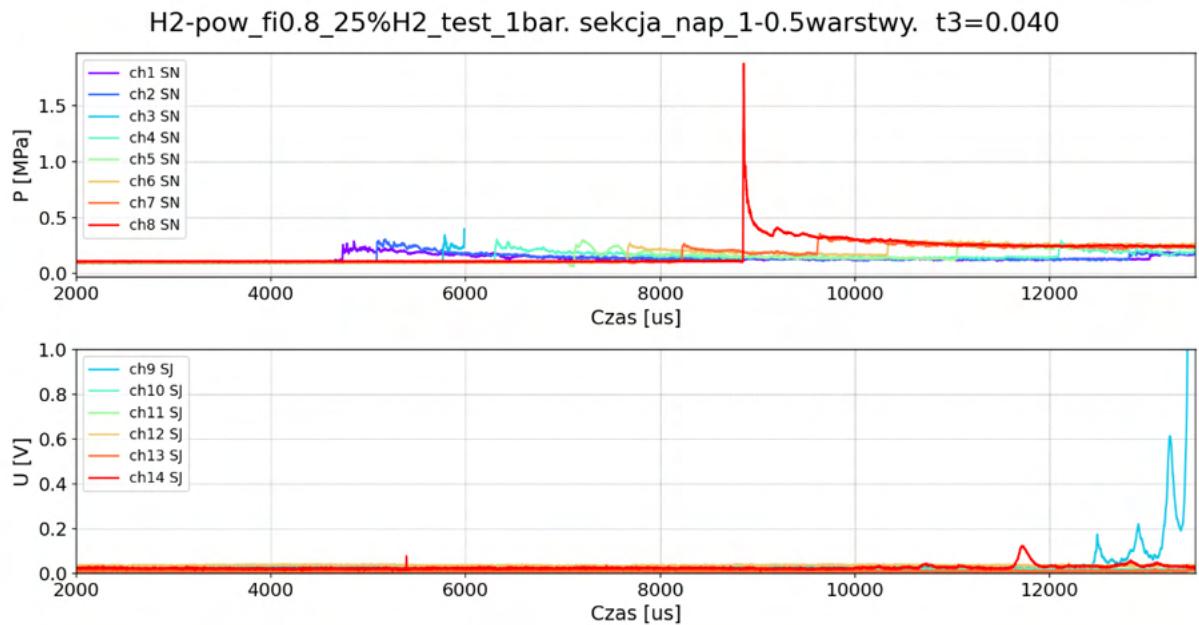


Rysunek 163 Eksperyment 4 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie maksymalne w narożu o wartości 4,5 MPa. W przybliżeniu prędkość propagacji fali ciśnieniowej stała, po odbiciu prędkość wyraźnie rośnie wraz z odległością. Prędkość frontu płomienia zmienna. Zarejestrowano zainicjowany płomień wtórny w narożu. Opóźniony zapłon w narożu IDT = 7 us.

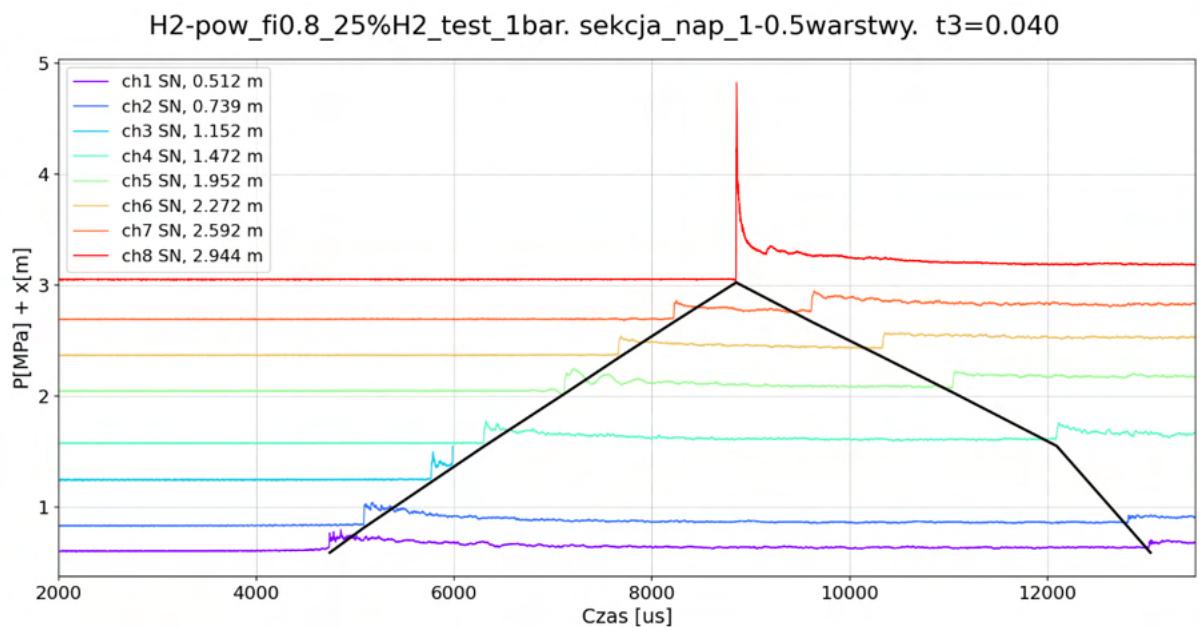
## Eksperyment 5.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



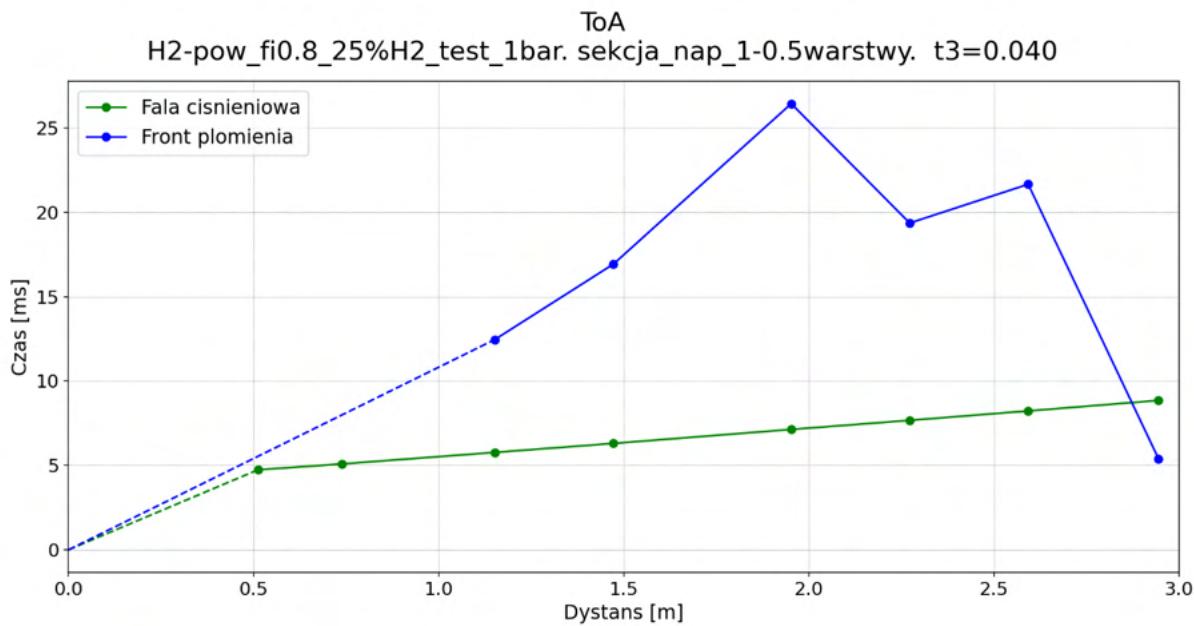
Rysunek 164 Eksperyment 5 ( $\Phi = 0,8$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



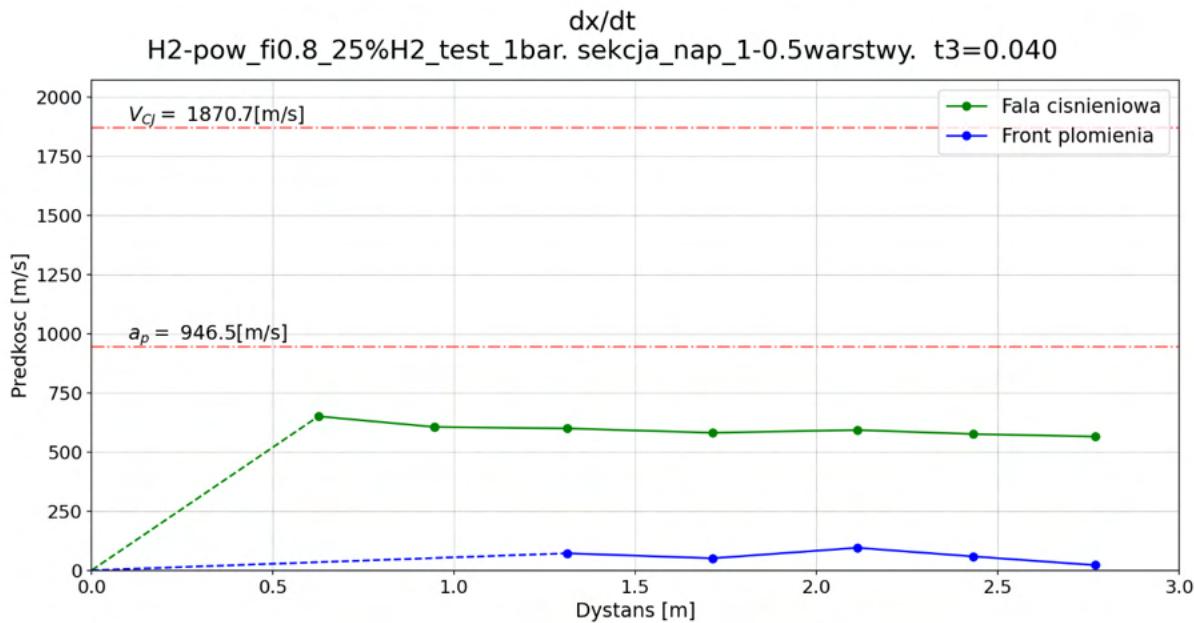
Rysunek 165 Eksperyment 5 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 166 Eksperyment 5 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

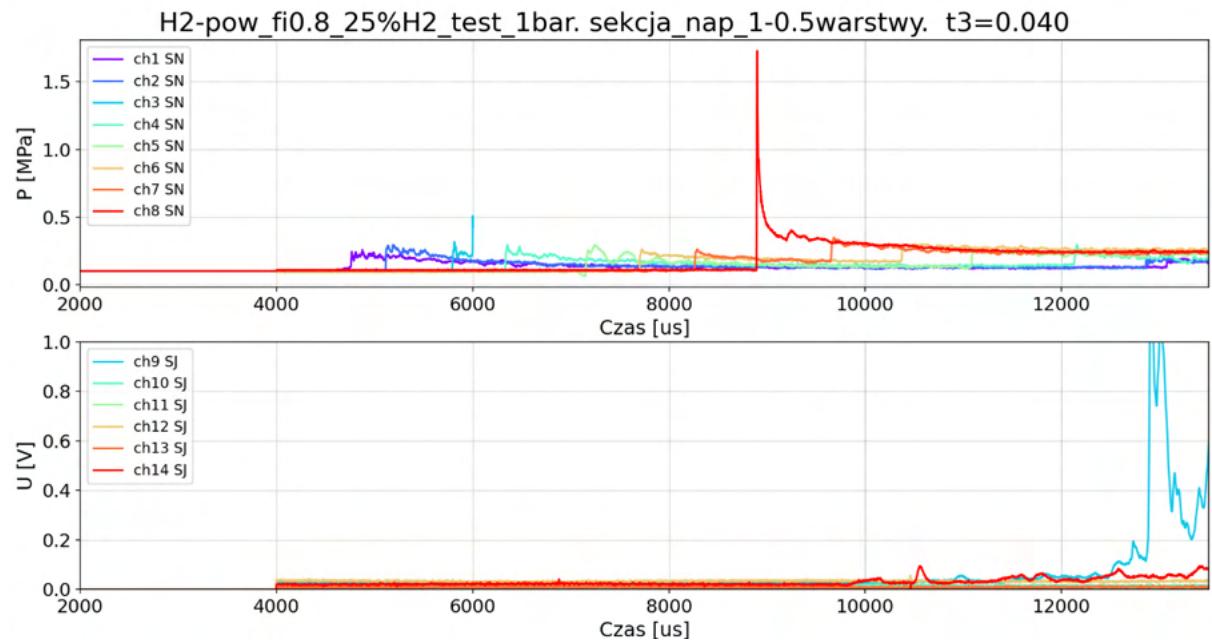


Rysunek 167 Eksperyment 5 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie maksymalne o wartości MPa 1,9 w narożu. Słabe pomiary napięcia na sondach. Propagacja fali ciśnieniowej wzdłuż rury w przybliżeniu stała, po odbiciu powrót fali z prędkością zbliżoną do ok. 2,5 długości rury, następnie przyspieszenie fali. Nierzeczywisty przebieg ToA płomienia, wynikający z błędного zadziałania sond. Opóźniony zapłon w narożu IDT = 2758 us (odczytane ręcznie).

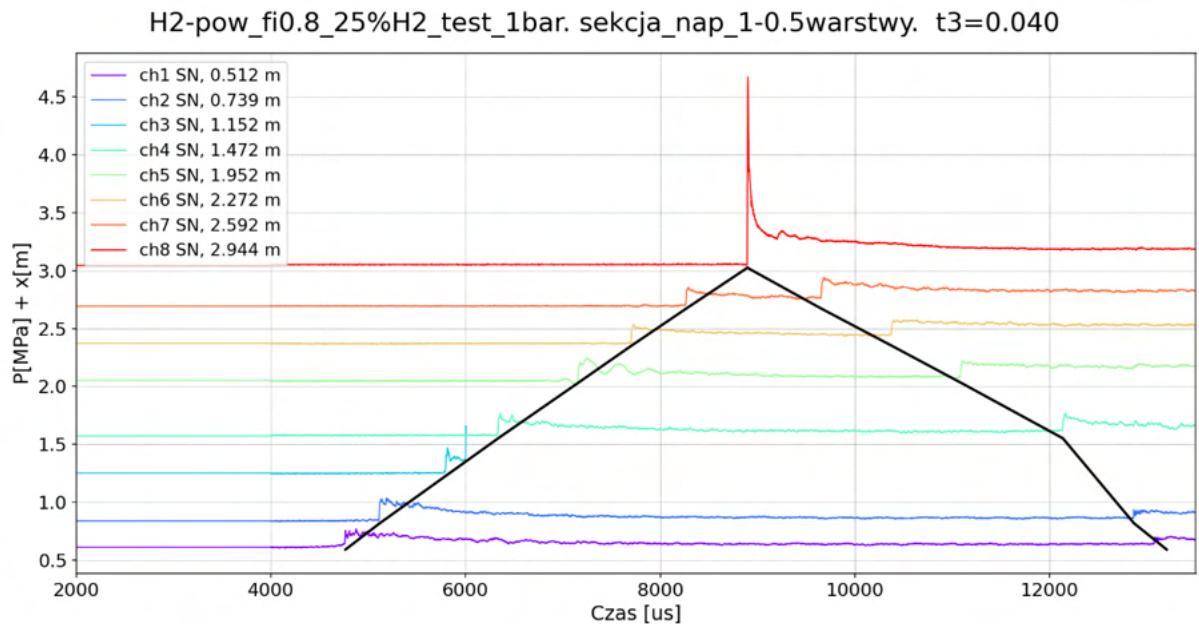
## Eksperyment 6.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



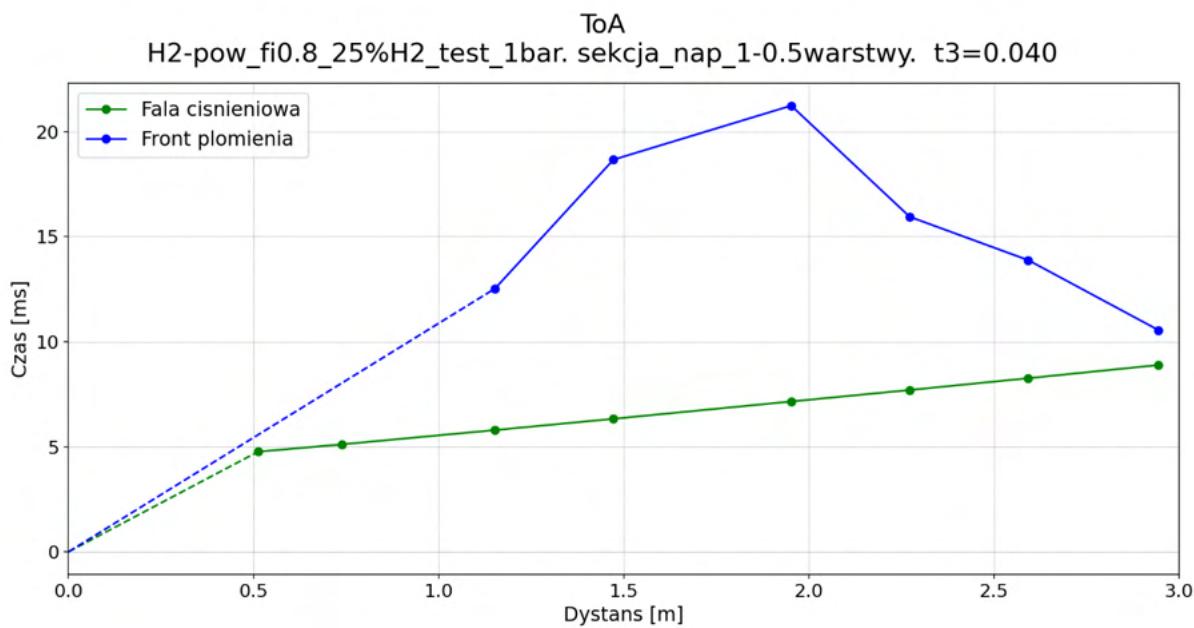
Rysunek 168 Eksperyment 6 ( $\Phi = 0,8$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



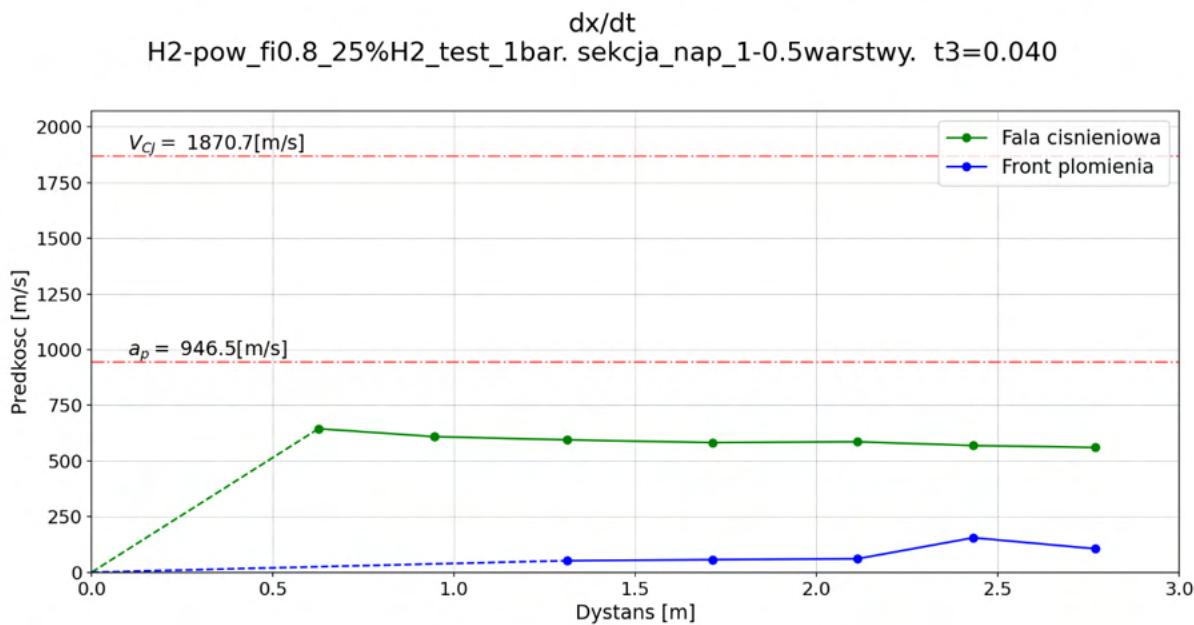
Rysunek 169 Eksperyment 6 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 170 Eksperyment 6 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

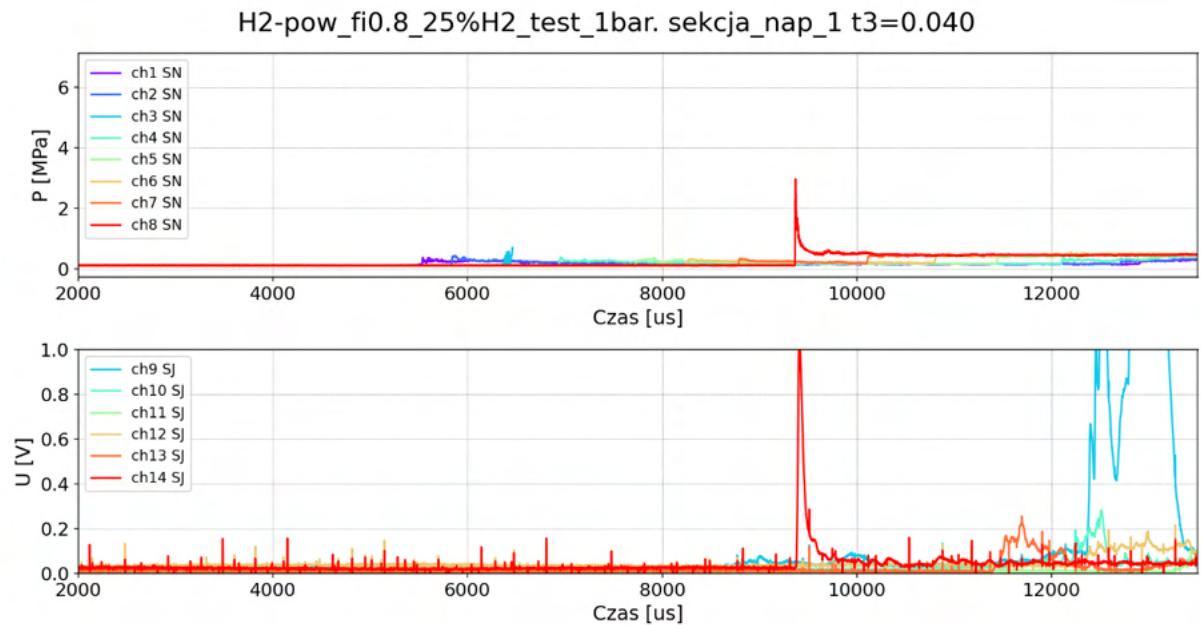


Rysunek 171 Eksperyment 6 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie maksymalne o wartości 1,7 MPa. Prędkość fali ciśnieniowej w przybliżeniu stała wzdłuż rury, po odbiciu powrót fali z prędkością zbliżoną, w okolicy 1,6 m długości rury przyspieszenie fali. Zaobserwowano płomień wtórny powstały w narożu propagujący w stronę pierwotnego. Prędkość frontu płomienia w przybliżeniu stała. Opóźniony zapłon w narożu IDT = 1660 us.

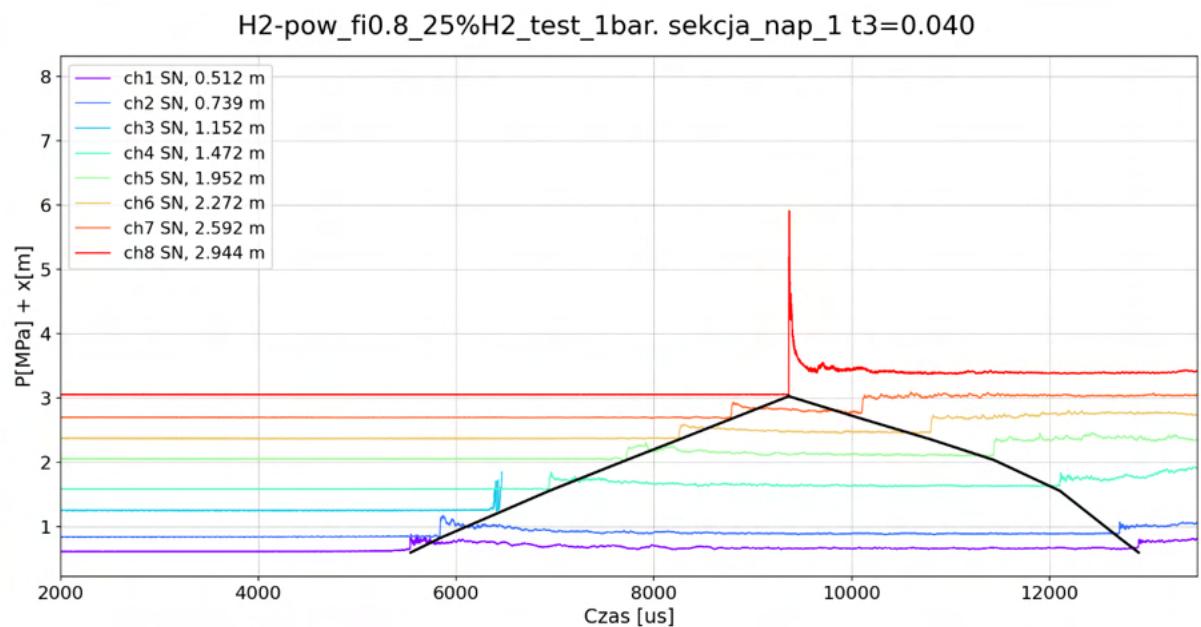
## Eksperyment 7.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



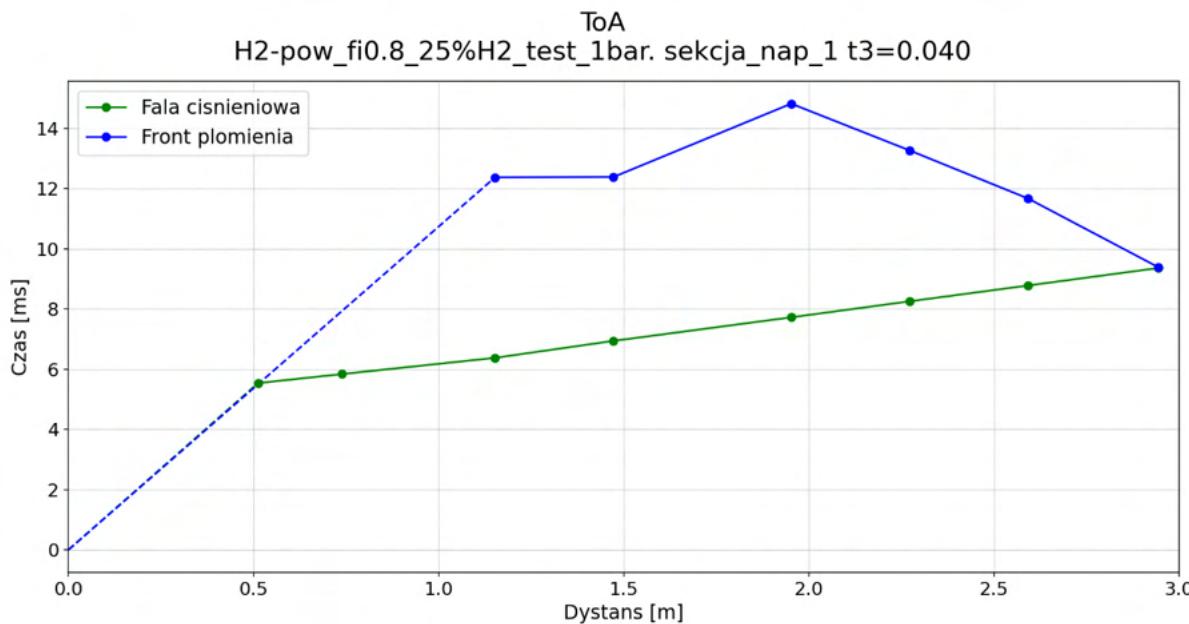
Rysunek 172 Eksperyment 7 ( $\Phi = 0,8$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



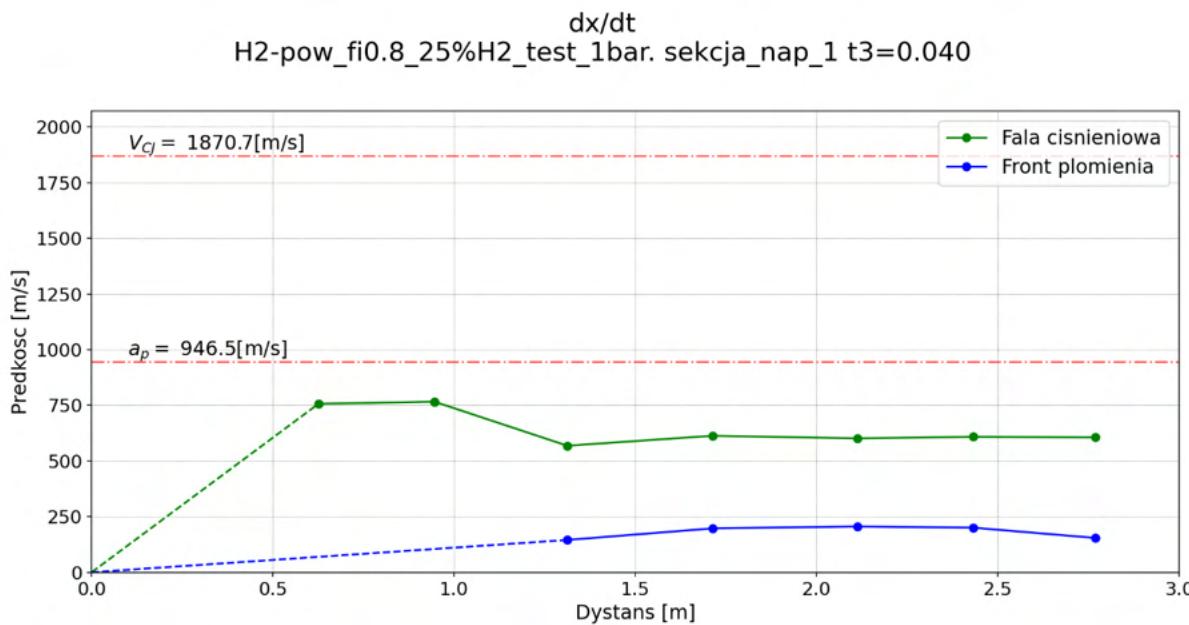
Rysunek 173 Eksperyment 7 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 174 Eksperyment 7 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

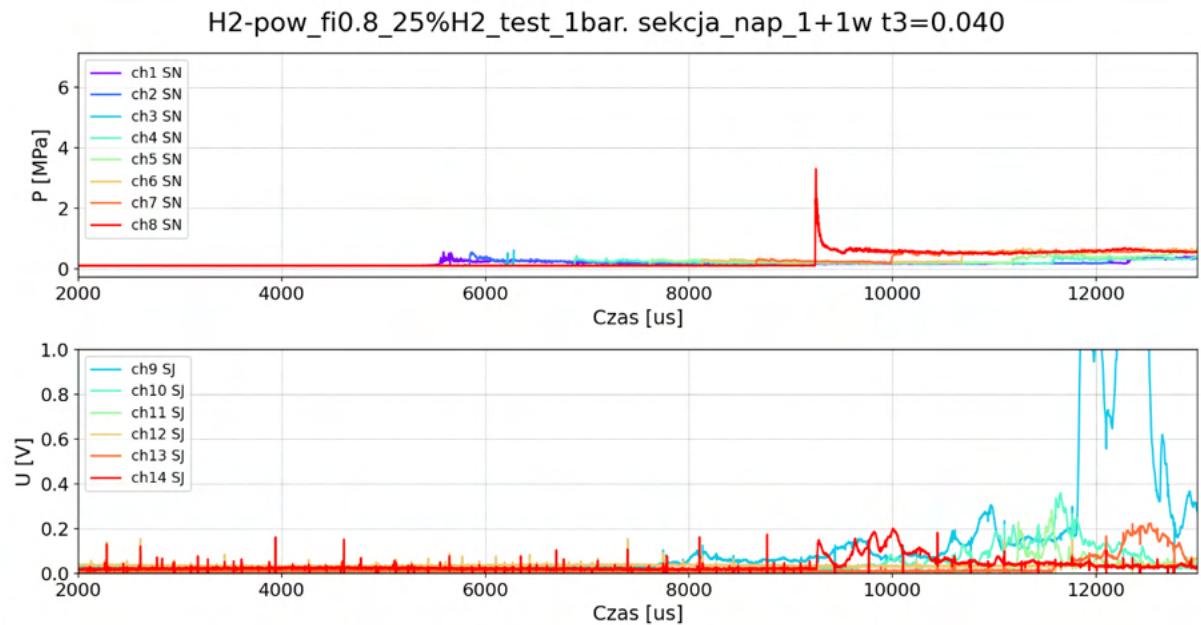


Rysunek 175 Eksperyment 7 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie maksymalne w narożu o wartości MPa. Zarejestrowane duże oscylacje działania ostatniej sondy jonizacyjnej. Prędkość propagacji fali ciśnieniowej w przybliżeniu stała, fala odbita wraca ze zbliżoną prędkością, w okolicy 2,3 m długości rury przyspiesza. Prędkość frontu płomienia w przybliżeniu stała. Zaobserwowano płomień wtórny w narożu propagujący w stronę płomienia pierwotnego, na 2 sondzie możliwy zniekształcony płomień. Opóźniony zapłon w narożu IDT = 22 us. Widoczne na rysunku 172 oscylacje napięcia na sondach spowodowane najprawdopodobniej urządzeniem działającym w okolicy stanowiska badawczego.

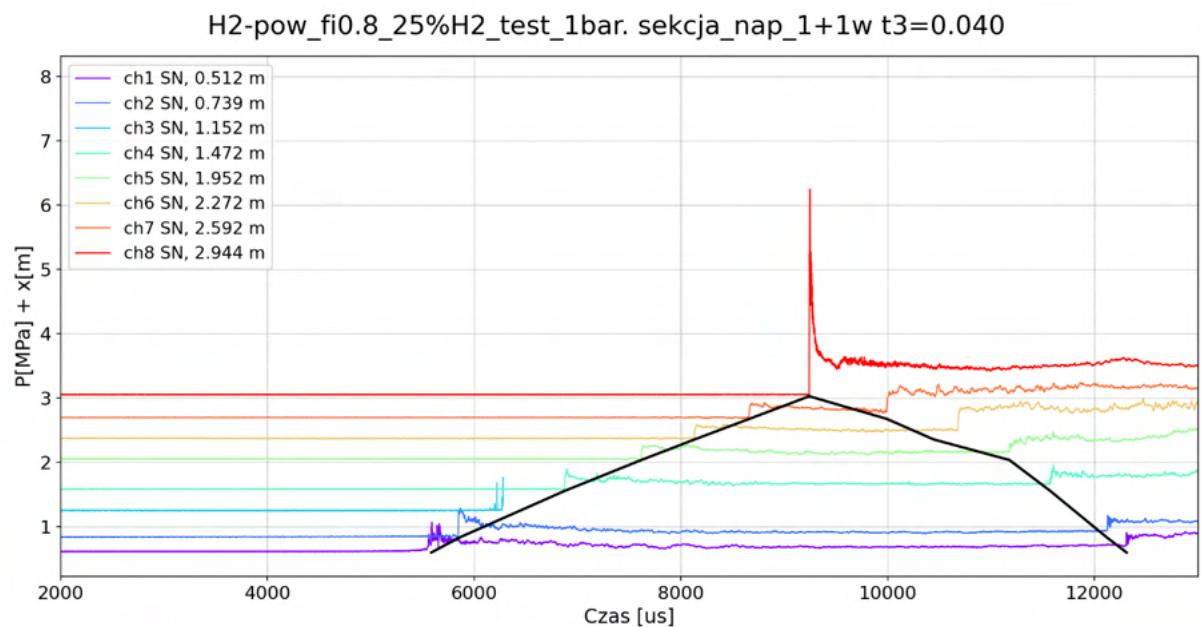
## Eksperyment 8.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



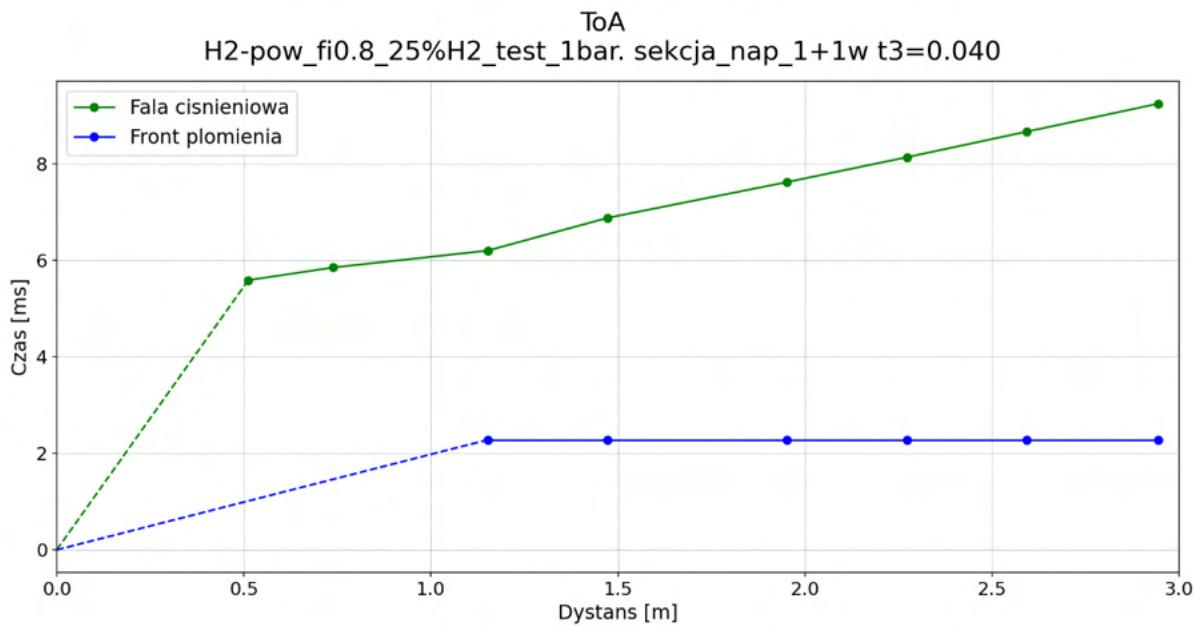
Rysunek 176 Eksperyment 8 ( $\Phi = 0,8$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



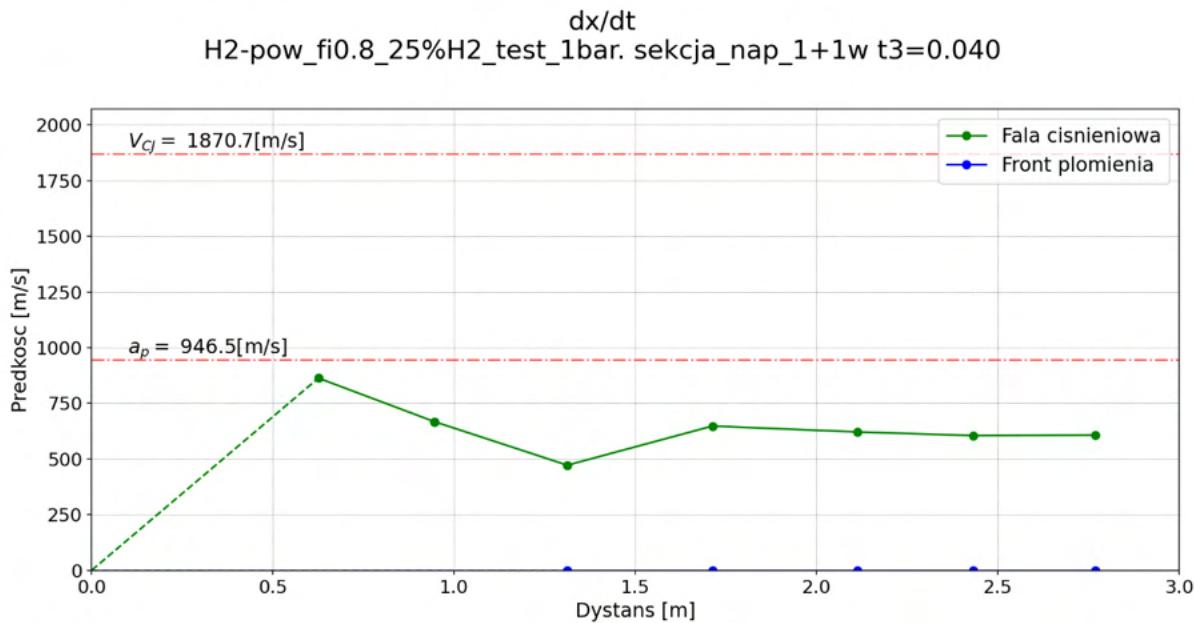
Rysunek 177 Eksperyment 8 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 178 Eksperyment 8 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:



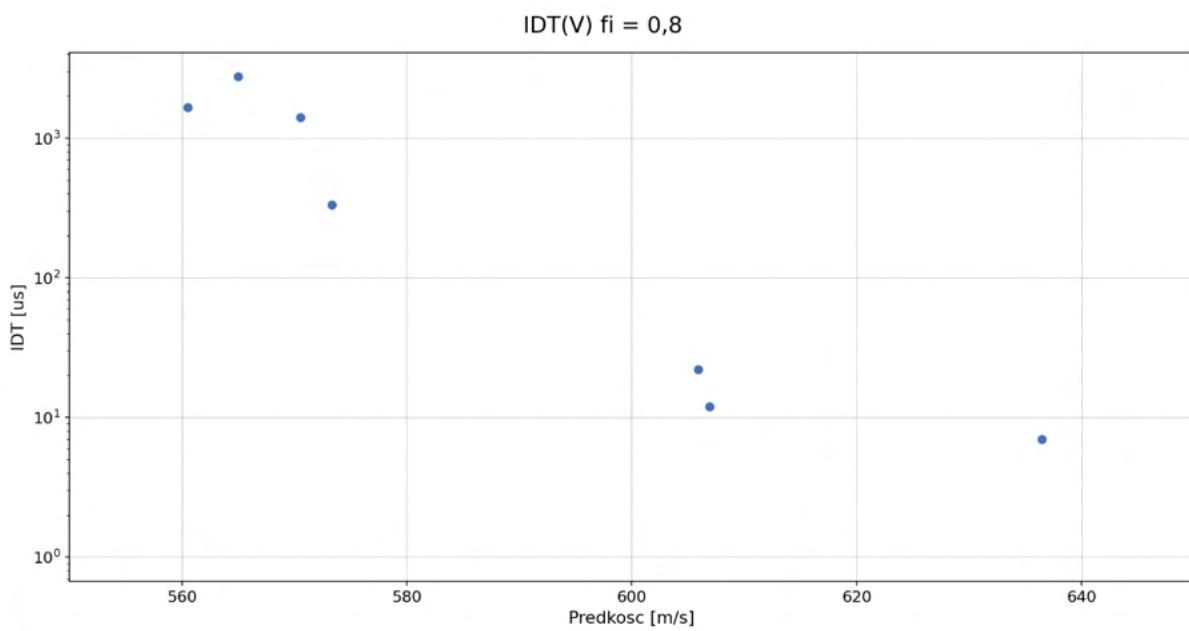
Rysunek 179 Eksperyment 8 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie maksymalne w narożu o wartości MPa. Zarejestrowane duże oscylacje działania ostatniej sondy jonizacyjnej. Prędkość propagacji fali ciśnieniowej w przybliżeniu stała, fala odbita wraca ze zbliżoną prędkością, w okolicy 2 m długości rury przyspiesza. Nieprawidłowe zadziałanie sond jonizacyjnych, dlatego brak wykresu prędkości płomienia i błędny wykres ToA. Widoczne na rysunku 176 oscylacje napięcia na sondach spowodowane najprawdopodobniej urządzeniem działającym w okolicy stanowiska badawczego. Opóźniony zapłon w narożu. IDT = 12 us (odczytane ręcznie).

Tabela 8 zestawienie wyników eksperymentów  $\phi = 0,8$ 

Nr eksperymentu	Prędkość fali w chwili uderzenia w naroże [m/s]	Czas opóźnienia zapłonu [us]	Czy doszło do detonacji	Czy zaszła deflagracja	Ciśnienie w narożu w momencie uderzenia fali [MPa]
1	570,5	1404	nie	tak	1,9
2	573,3	333	nie	tak	2,3
3	1786,8	1	tak (przedwczesna)	nie	25,2
4	636,5	7	nie	tak	4,5
5	565	2758	nie	tak	1,9
6	560,5	1660	nie	tak	1,7
7	605,9	22	nie	tak	3
8	606,9	12	nie	tak	3,3

Po przeprowadzeniu 8 eksperymentów dla mieszaniny o stężeniu 25% można wyciągnąć następujące wnioski. Nie zarejestrowano przejścia do detonacji w narożu. Prędkości fali ciśnieniowej w chwili uderzenia w naroże, dla której wystąpił opóźniony zapłon mieszczą się w zakresie 560,5-636,5 m/s. Najmniejsze odnotowane IDT (poza detonacją) wynosi 7 us, natomiast największe 2758 us. Ciśnienia mieszczą się w zakresie od 1,7 MPa do 4,5 MPa. Odnotowano przedwczesną detonację o prędkości 1786,8 m/s oraz ciśnieniu w narożu równym 25,2 MPa.



Rysunek 180 Wykres opóźnienia zapłonu w funkcji prędkości fali ciśnieniowej ( $\Phi = 0,8$ )

Na podstawie wykresu można wyróżnić jedną dużą grupę punktów dla IDT o wartościach powyżej 570 us (prędkość fali ciśnieniowej poniżej 607 m/s) oraz dwa pojedyncze punkty. Pierwszy o ITD równym 7 us i prędkości 637 us oraz punkt z natychmiastowym zapłonem i prędkością przy narożu około 1787 m/s.

#### 5.4 Badanie mieszaniny o współczynniku ekwiwalencji $\Phi = 1,28$

Ostatnią przebadaną mieszaniną jest mieszanina wodorowo-powietrzna o zawartości wodoru 35% ( $\phi = 1,28$ ). Wykonanych zostało 6 eksperymentów dla tej samej konfiguracji sekcji napędzającej (niektóre w szerszym rozstawieniu dwóch ostatnich warstw). Wyniki przeprowadzonych badań zaprezentowano poniżej.

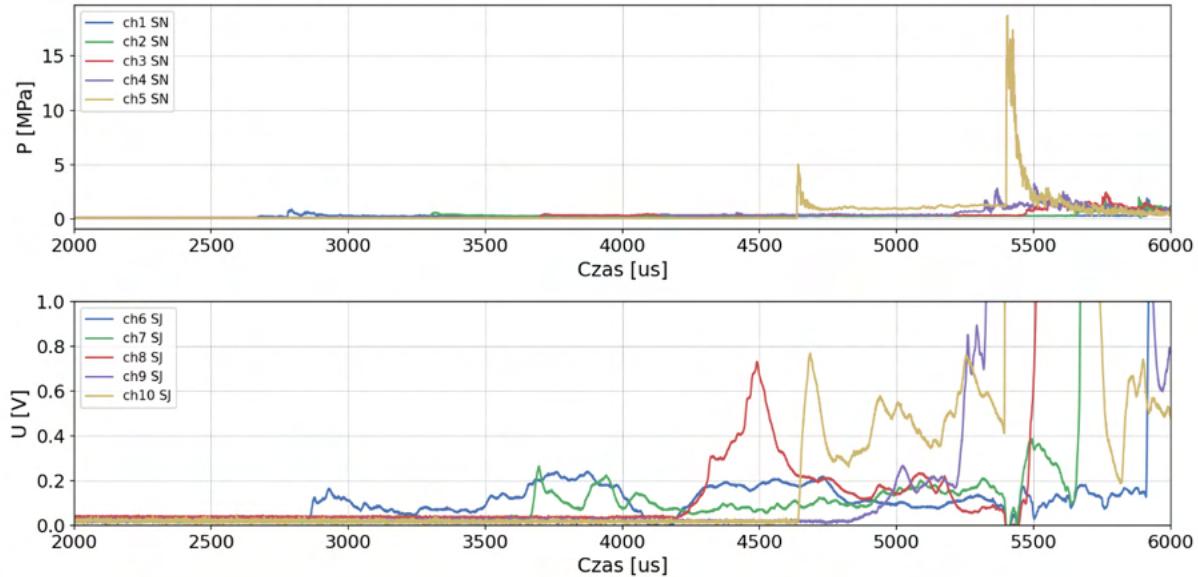
Tabela 9 konfiguracje sekcji napędzającej mieszaniny  $\Phi = 1,28$

Konfiguracja 2 stanowiska badawczego	
Eksperyment 1	1 człon sekcji + 6,5 warstwy
Eksperyment 2	1 człon sekcji + 6,5 warstwy
Eksperyment 3	1 człon sekcji + 6,5 warstwy
Eksperyment 4	1 człon sekcji + 6,5 warstwy
Eksperyment 5	1 człon sekcji + 6,5 warstwy
Eksperyment 6	1 człon sekcji + 6,5 warstwy

## Eksperyment 1.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:

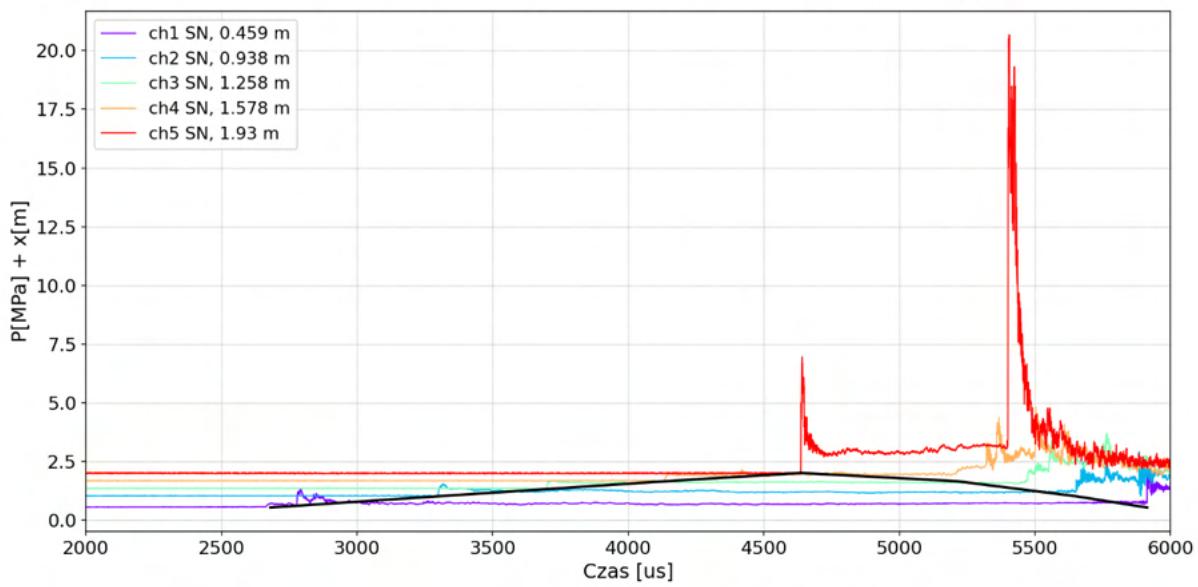
35%H2-pow\_fi1.28\_test\_1bar. 2m rura. sekcja\_nap\_1+4.5w+2w\_szerokow. t3=0.040



Rysunek 181 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1,28$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

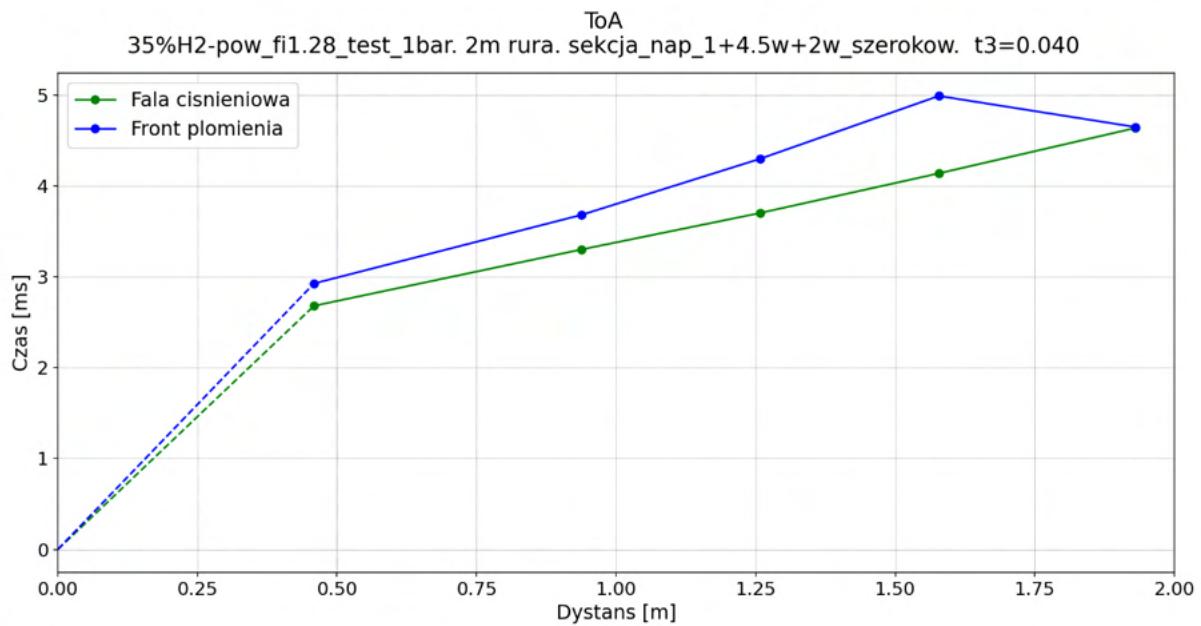
Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:

35%H2-pow\_fi1.28\_test\_1bar. 2m rura. sekcja\_nap\_1+4.5w+2w\_szerokow. t3=0.040



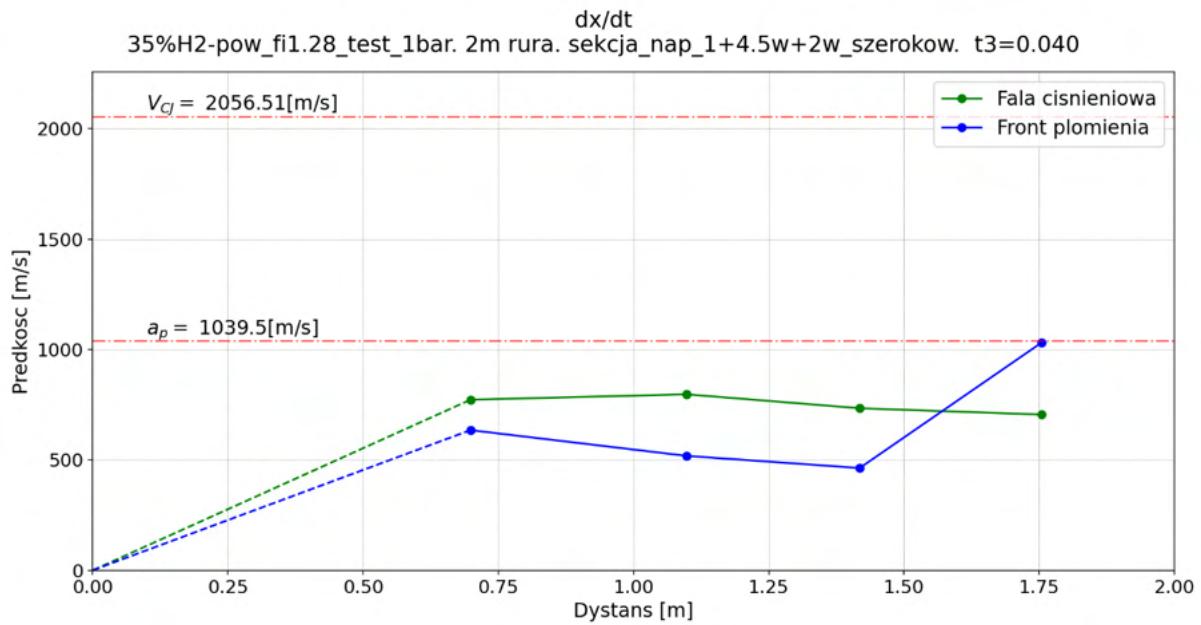
Rysunek 182 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 183 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:



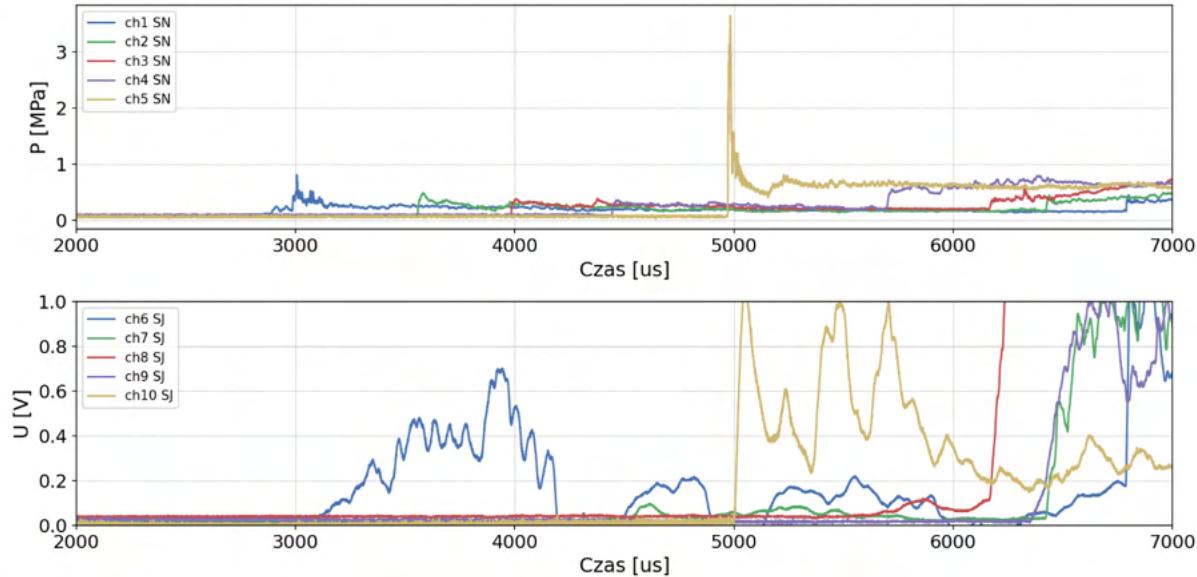
Rysunek 184 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Zarejestrowane ciśnienie o wartości 5 MPa w narożu, po odbiciu i powtórnym dojściu do naroża ciśnienie wyniosło ok. 19 MPa. W przybliżeniu stała prędkość propagacji fali ciśnieniowej, po odbiciu fala przyspiesza wraz z odległością. Zarejestrowano zainicjowany wtórny płomień w narożu. Front płomienia liniowo zwalnia do ok 1,4 m długości rury, następnie przyspiesza. Późniejsze po odbiciu przejście do detonacji w objętości rury pomiędzy czujnikami. Opóźniony zapłon w narożu IDT = 11 us.

## Eksperyment 2.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:

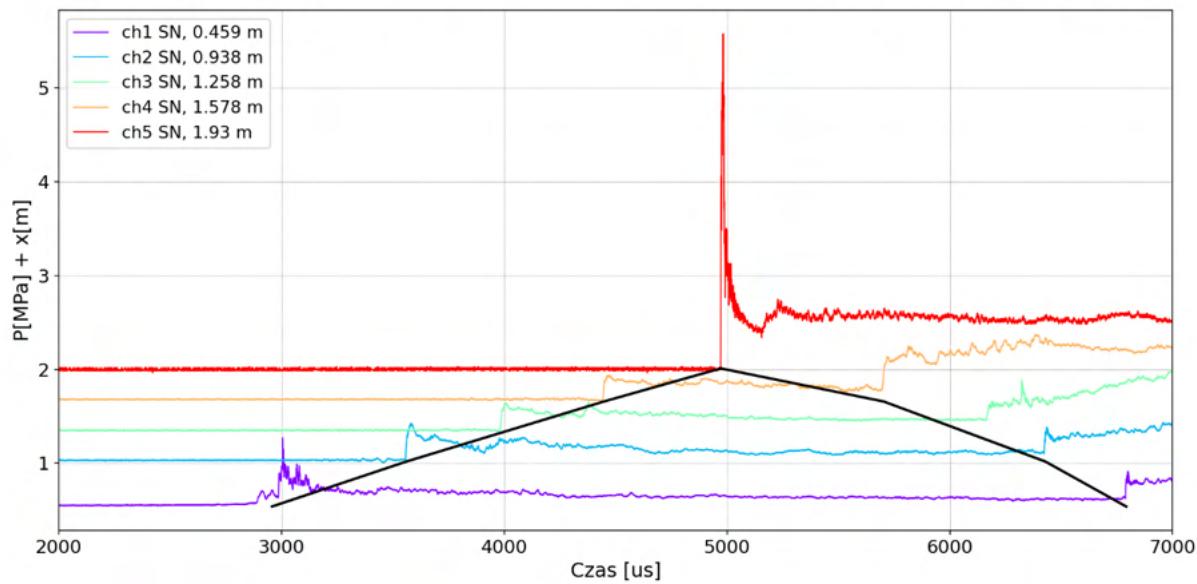
35%H2-pow\_fi1.28\_test\_1bar. 2m rura. sekcja\_nap\_1+4.5w+2w\_szerokow. t3=0.040



Rysunek 185 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1,28$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

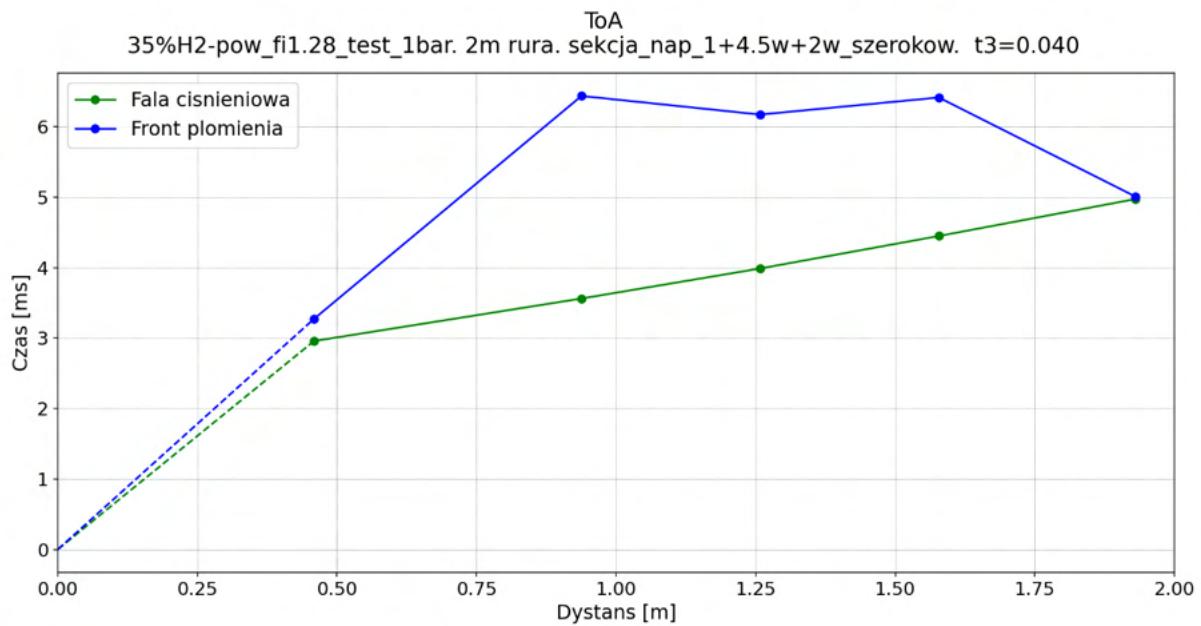
Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:

35%H2-pow\_fi1.28\_test\_1bar. 2m rura. sekcja\_nap\_1+4.5w+2w\_szerokow. t3=0.040



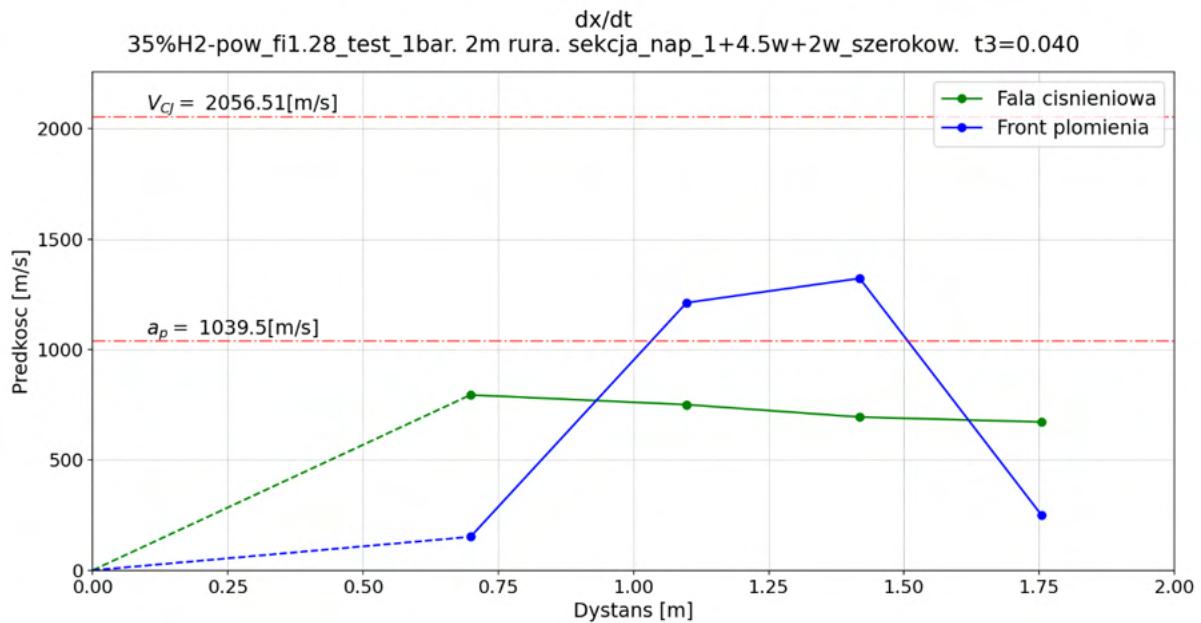
Rysunek 186 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 187 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

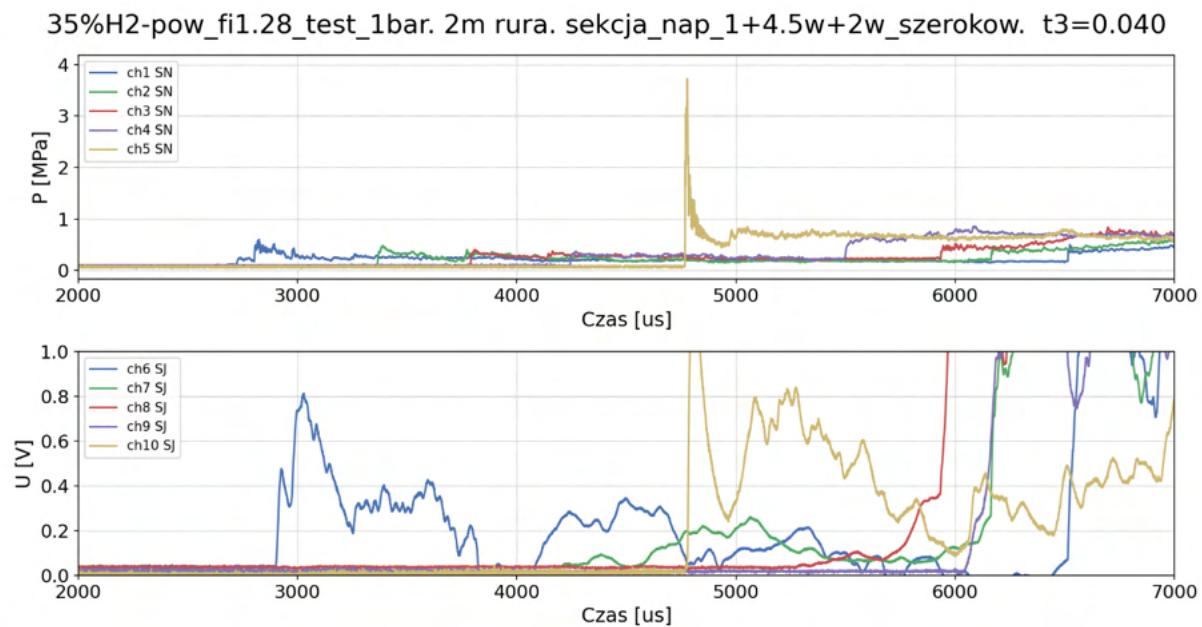


Rysunek 188 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie maksymalne zarejestrowane w narożu 3,6 MPa. W przybliżeniu stała prędkość fali ciśnieniowej wzduż kanału, po odbiciu prędkość wzrasta wraz z odległością. Zarejestrowano płomień wtórny w narożu oraz prawdopodobnie zniekształcony płomień. Zmienna prędkość płomienia wzduż rury spowodowana najprawdopodobniej zniekształconym przy ścianach płomieniem. Opóźniony zapłon IDT = 12,5 us.

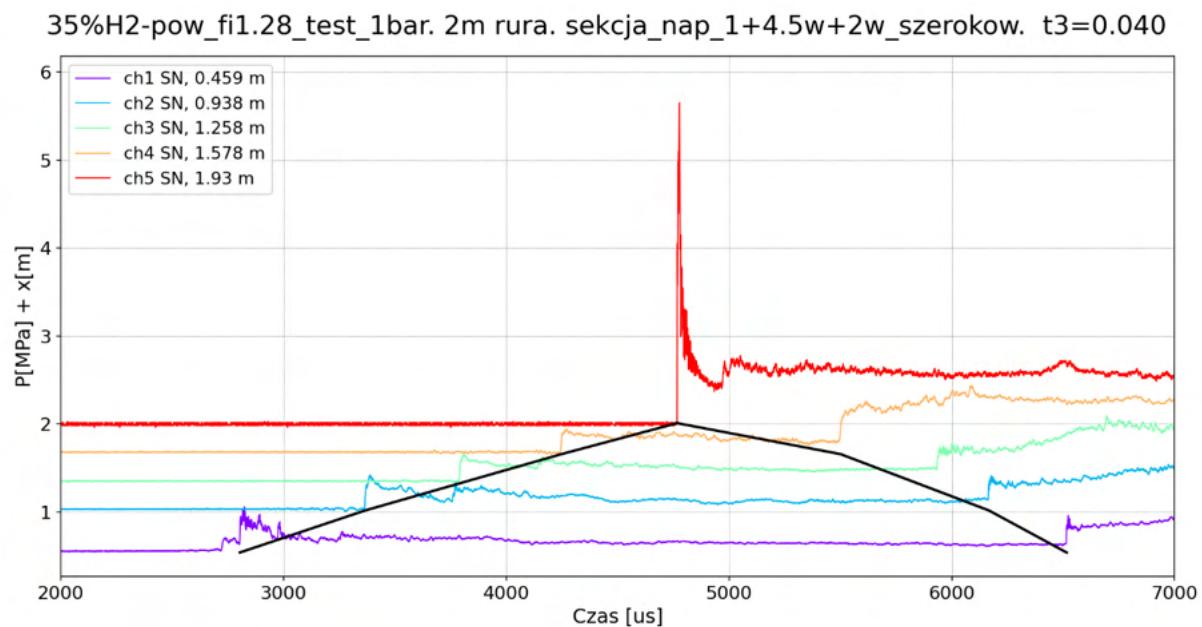
### Eksperyment 3.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



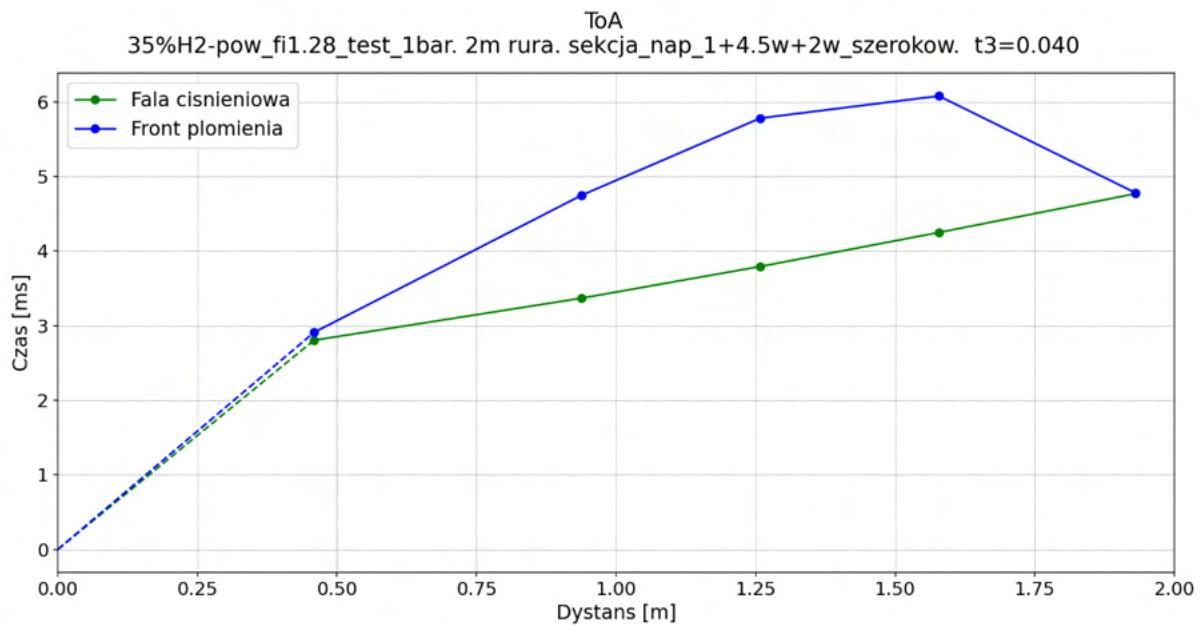
Rysunek 189 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1,28$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



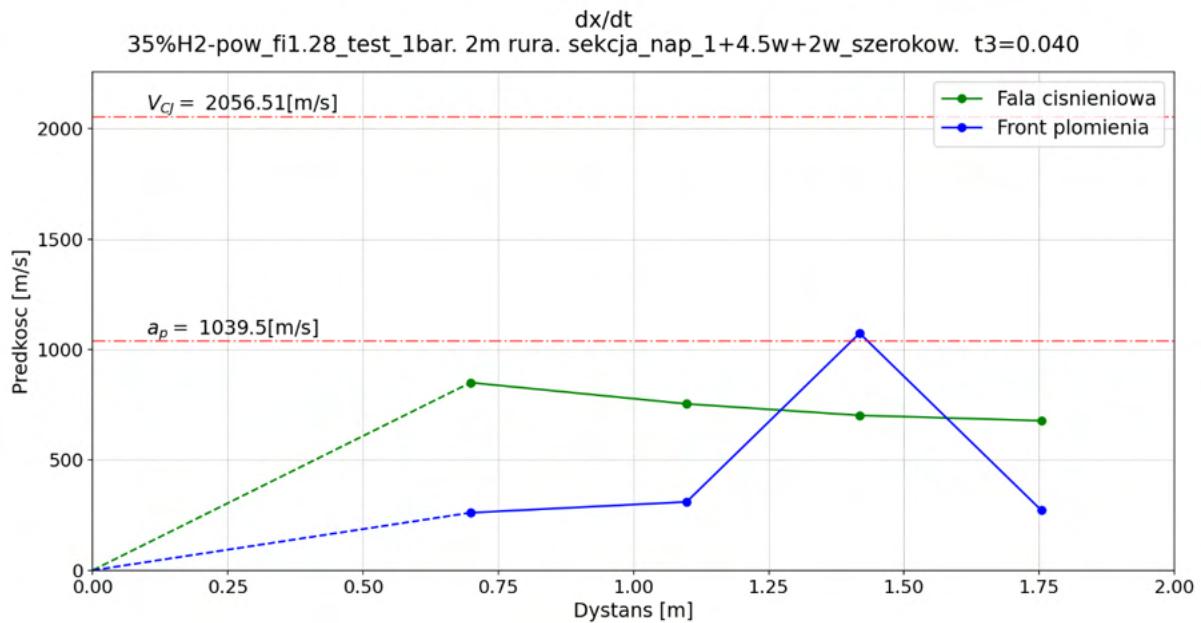
Rysunek 190 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 191 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

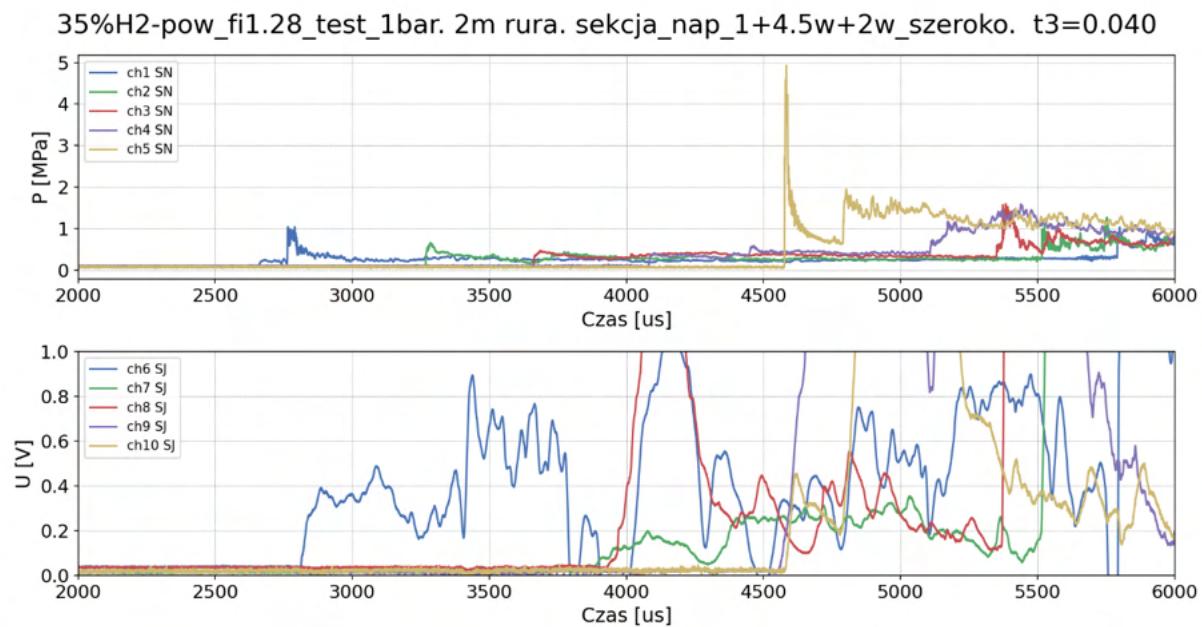


Rysunek 192 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie w narożu o wartości 3,7 MPa, po odbiciu i powtórnym dojściu do naroża ok. 4 MPa. Propagacja fali ciśnienia w przybliżeniu o stałej prędkości, powrót fali z prędkością rosnącą wzdłuż odległości. Zarejestrowano płomień wtórny w narożu. Zmienna prędkość płomienia wzdłuż kanału. Opóźniony zapłon w narożu IDT = 12,5 us.

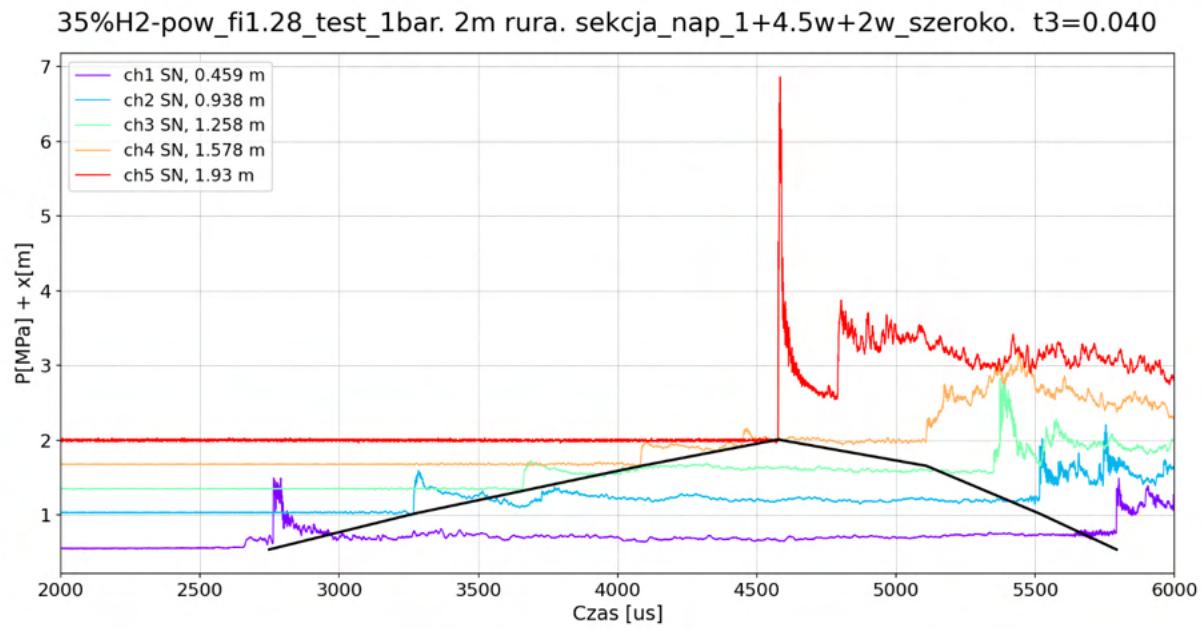
## Eksperyment 4.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



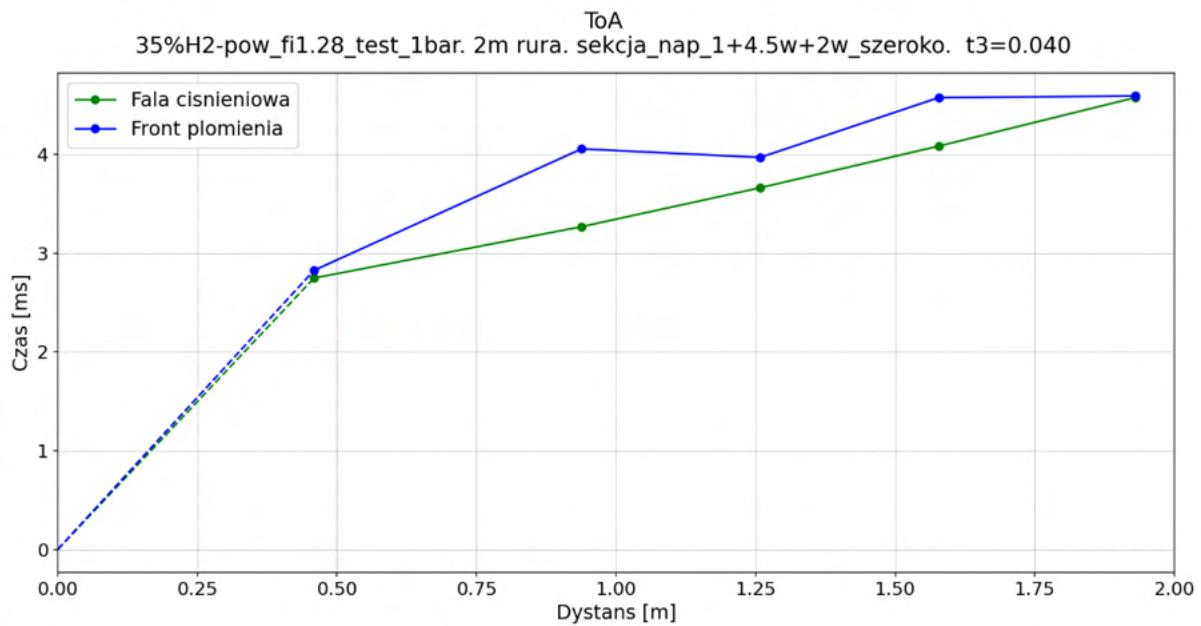
Rysunek 193 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1,28$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



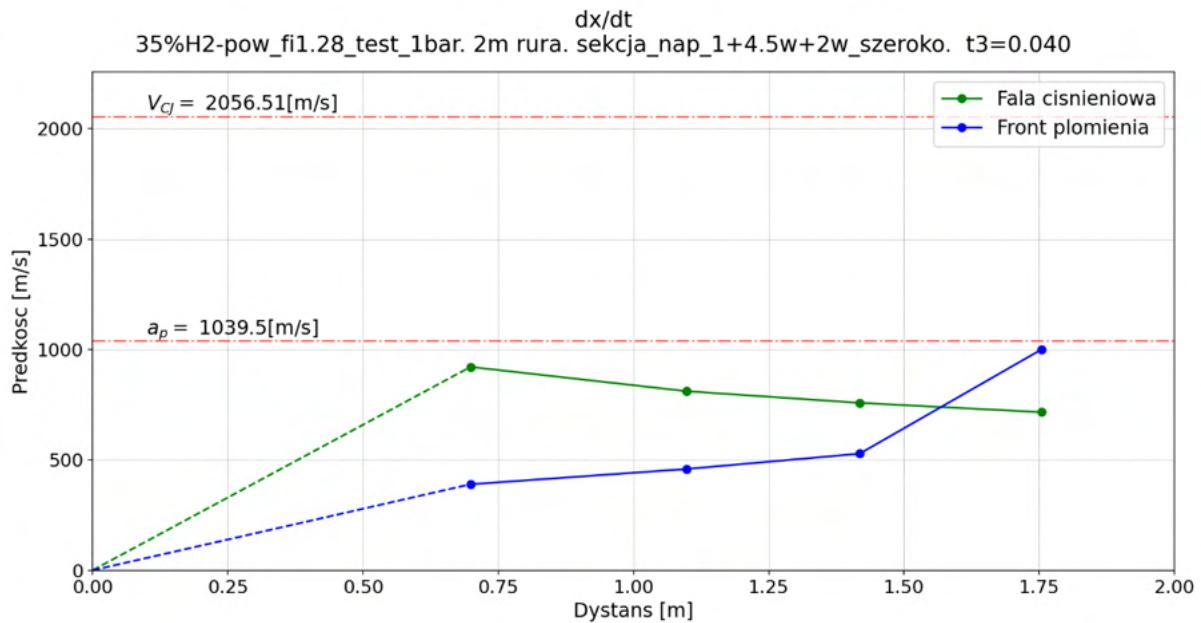
Rysunek 194 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 195 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

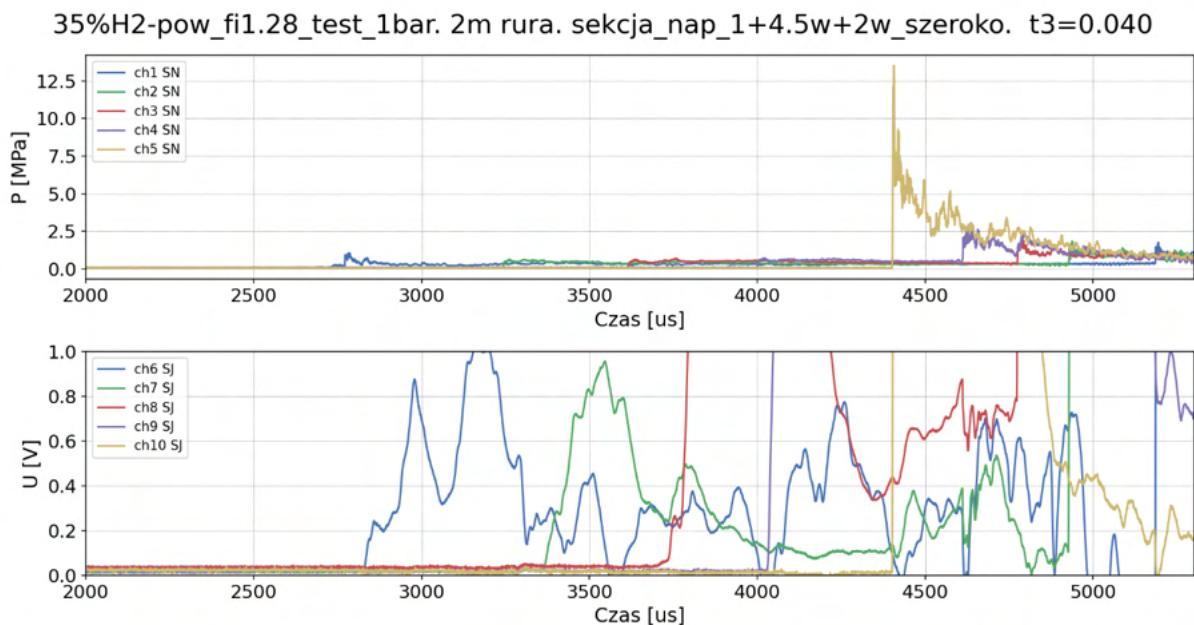


Rysunek 196 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie maksymalne zarejestrowane w narożu o wartości 4,9 MPa. Prędkość fali w przybliżeniu stała wzdłuż kanału, po odbiciu wyraźnie wzrasta wraz z odległością. Prędkość frontu płomienia rośnie wzdłuż długości rury. Zaobserwowano zniekształcony płomień przy ścianach na trzeciej sondzie jonizacyjnej, co tłumaczy jej przedwczesną aktywację. Opóźniony zapłon IDT = 16 us.

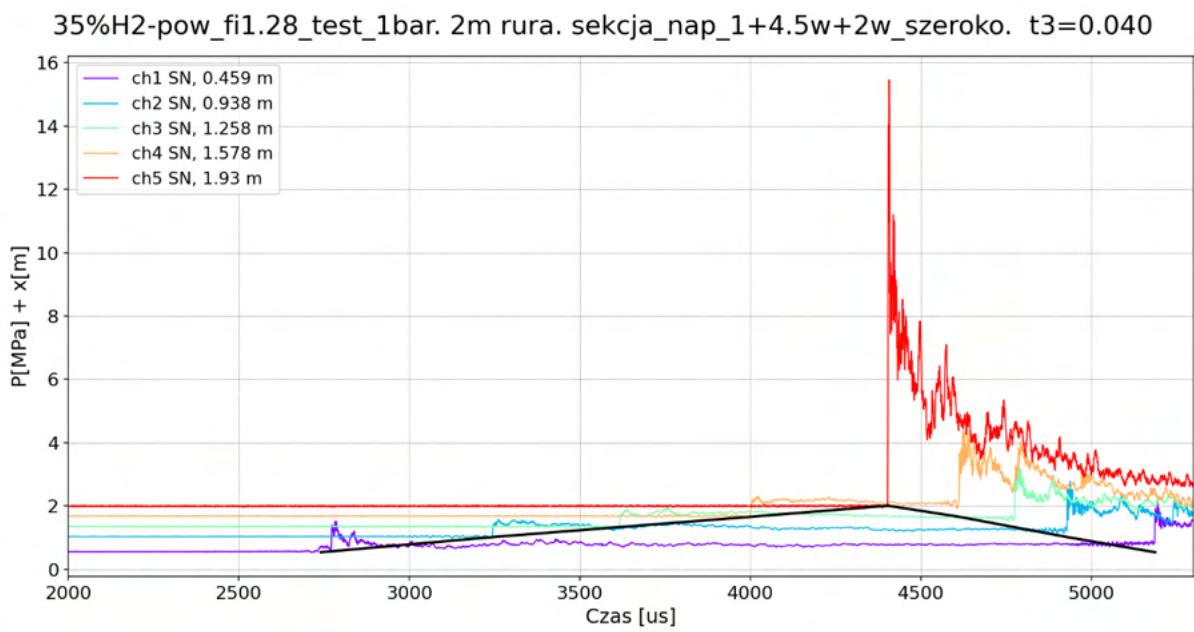
## Eksperyment 5.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



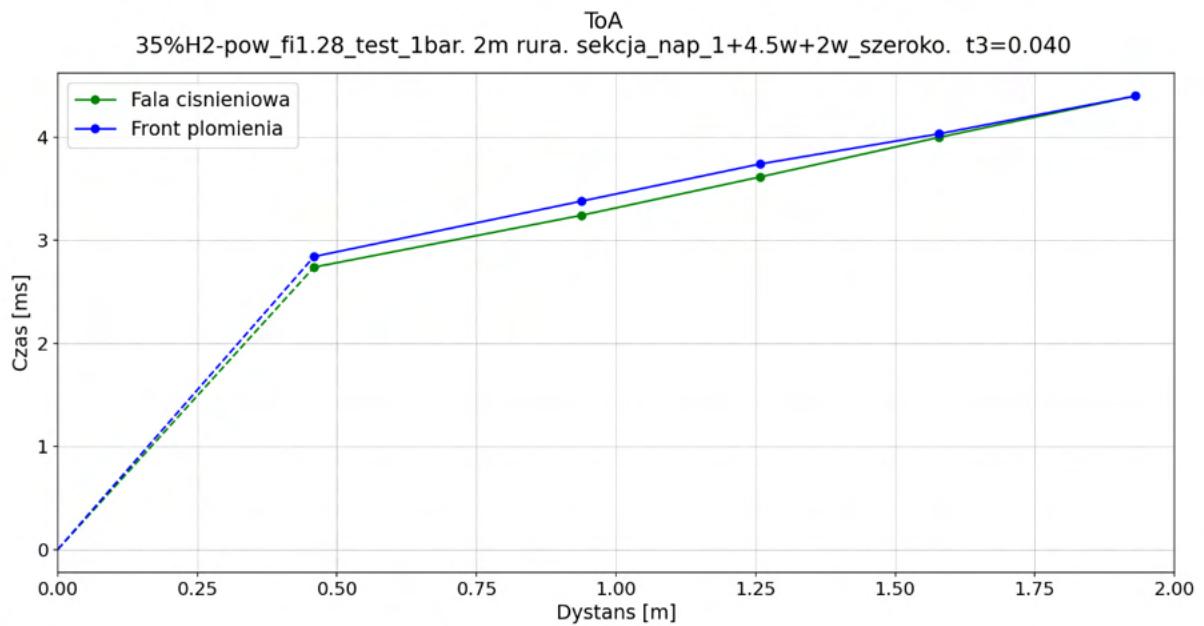
Rysunek 197 Eksperyment 5 ( $\Phi = 1,28$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



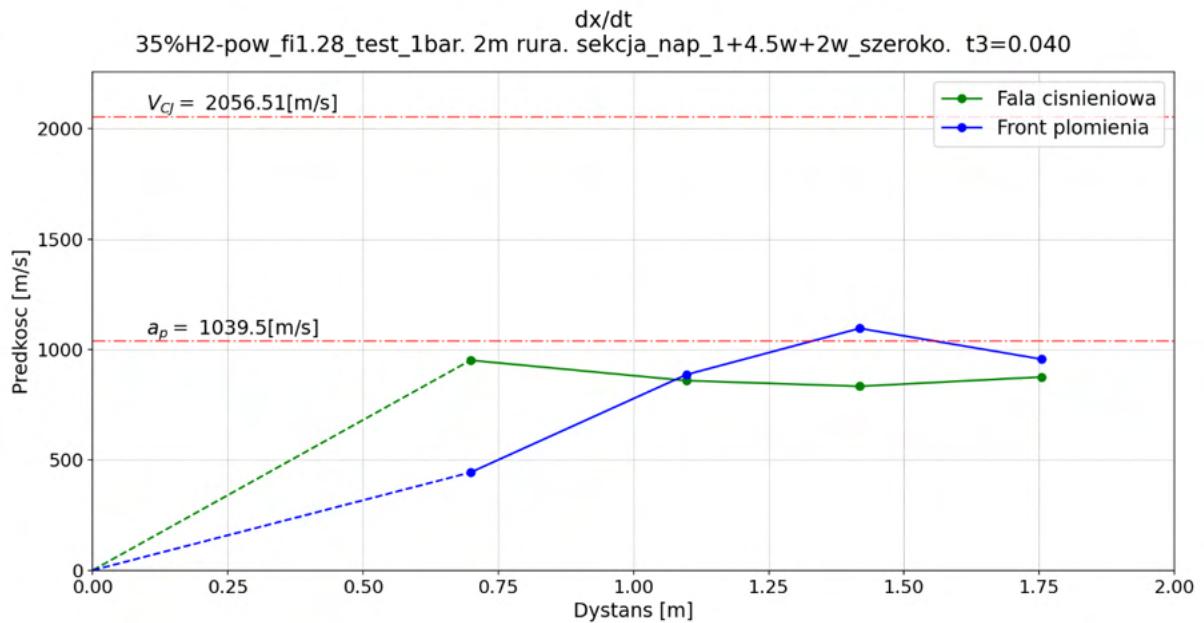
Rysunek 198 Eksperyment 5 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 199 Eksperyment 5 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:

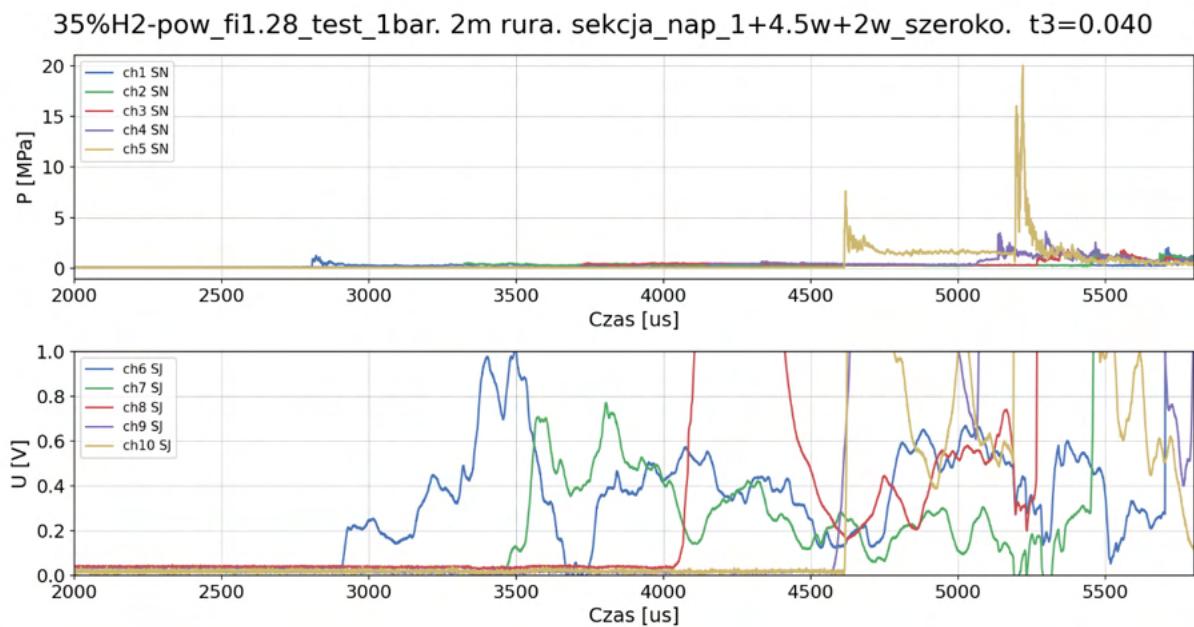


Rysunek 200 Eksperyment 5 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Maksymalne ciśnienie w narożu wynosi 13,5 MPa. Prędkość propagacji wzdłuż fali w przybliżeniu stała, po odbiciu fala wyraźnie przyspiesza i propaguje w przybliżeniu ze stałą prędkością. Prędkość frontu płomienia rośnie liniowo do ok. 1,4 m długości rury, następnie maleje. Detonacja w narożu IDT = 1 us. Prędkość detonacji po odbiciu od naroża wynosi 1680,2 m/s

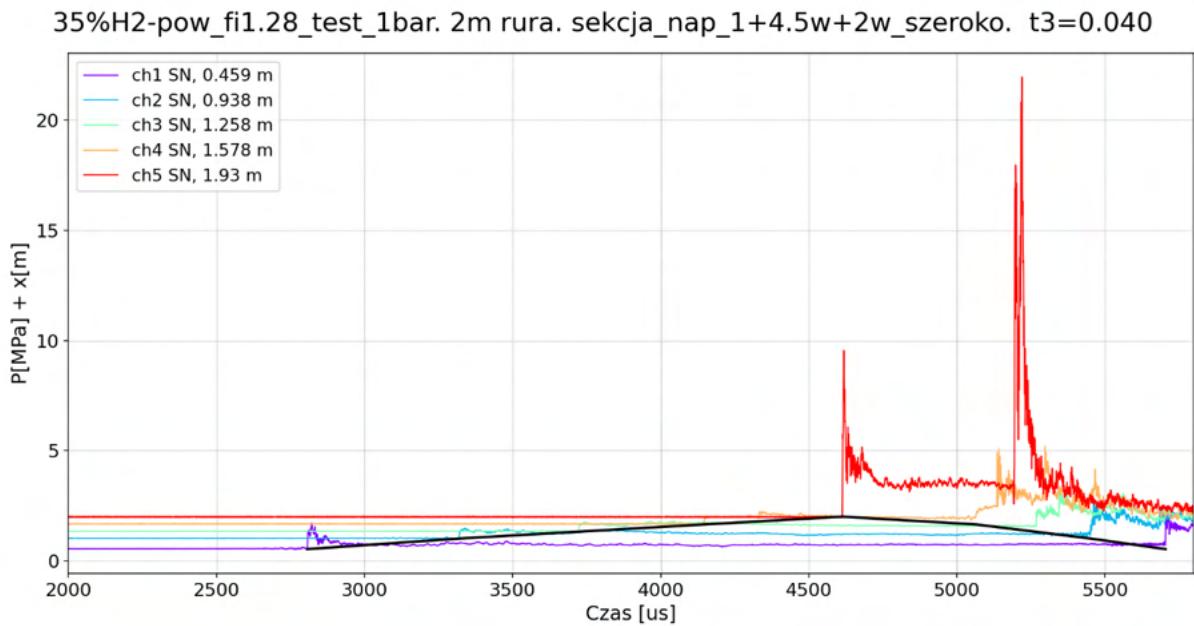
## Eksperyment 6.

Przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych:



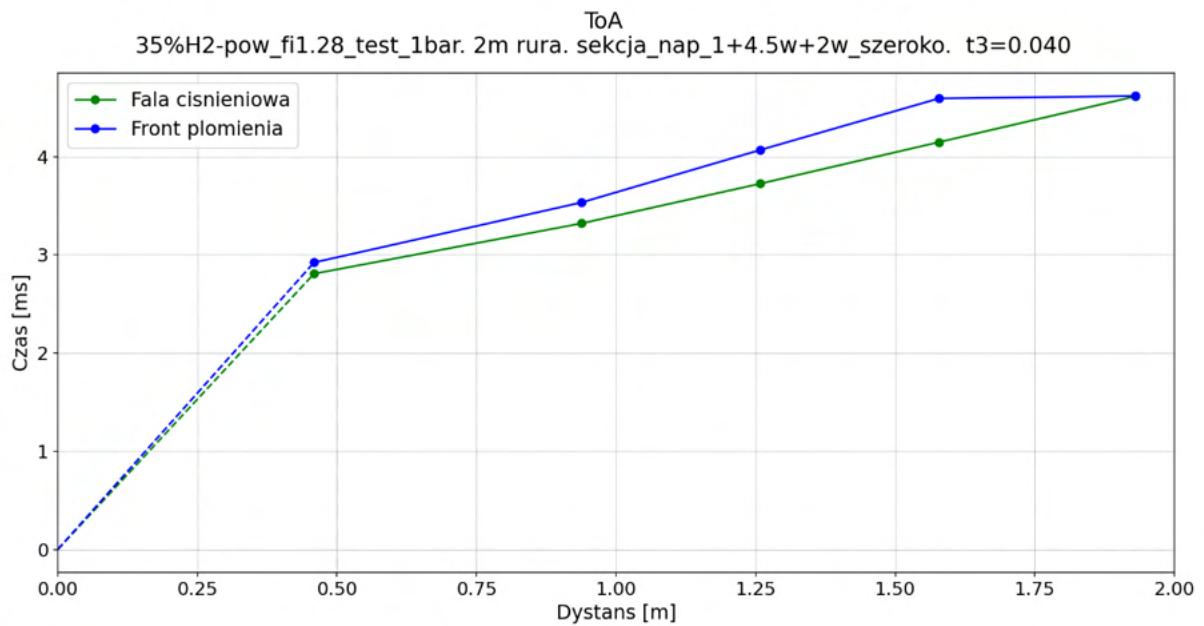
Rysunek 201 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1,28$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych

Wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej:



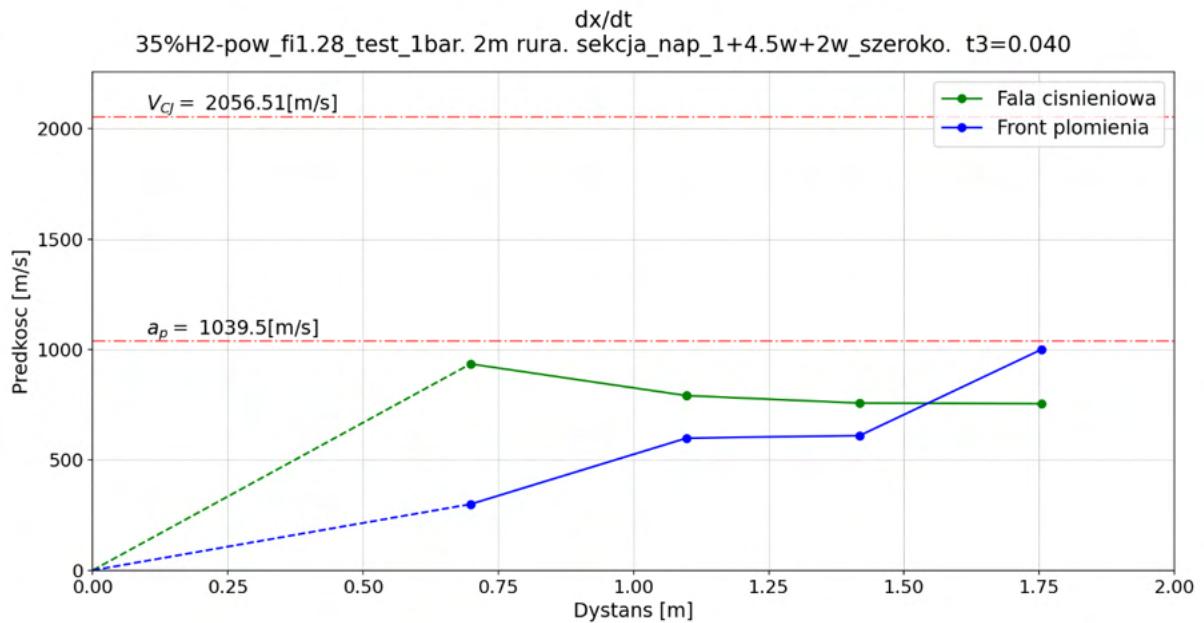
Rysunek 202 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej

Wykres ToA:



Rysunek 203 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres ToA

Wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia:



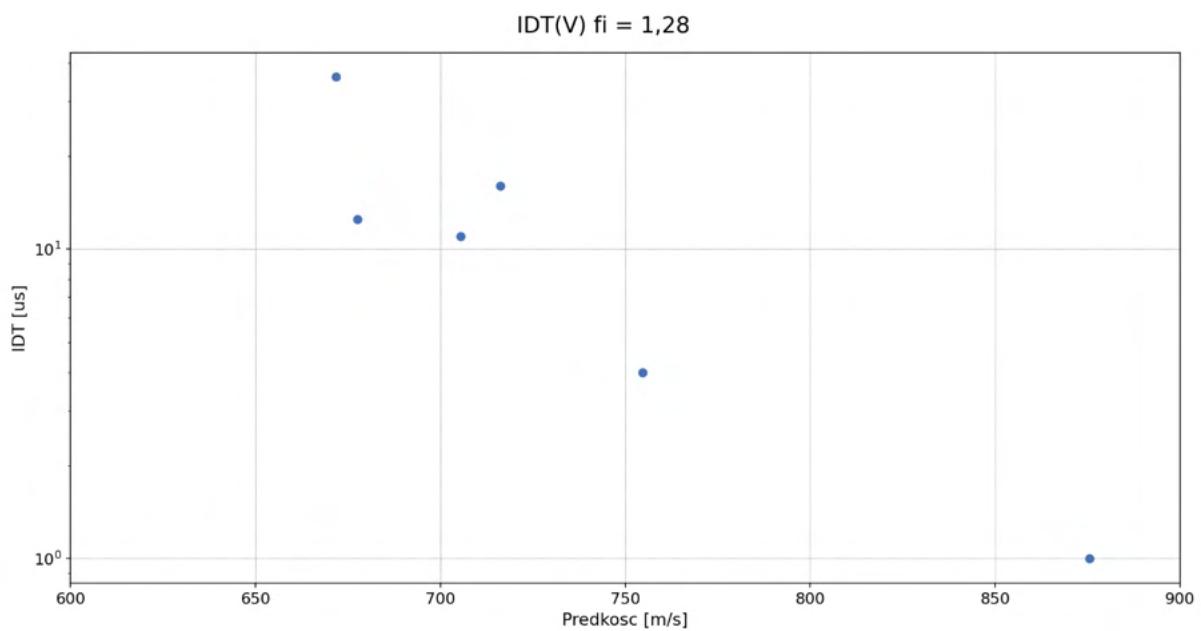
Rysunek 204 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia

Ciśnienie w narożu przed odbicie równe 7,6 MPa, maksymalne ciśnienie zarejestrowane to 20,1 MPa. Prędkość fali w przybliżeniu stała, po odbiciu prędkość wzrasta. Prędkość frontu płomienia rosnąca. Zaobserwowana detonacja po odbiciu między dwoma ostatnimi czujnikami. IDT w narożu równe 4 us.

Tabela 10 zestawienie wyników eksperymentów mieszaniny  $\phi = 1,28$ 

Nr eksperymentu	Prędkość fali w chwili uderzenia w naroże [m/s]	Czas opóźnienia zapłonu [us]	Czy doszło do detonacji	Czy zaszła deflagracja	Ciśnienie w narożu w momencie uderzenia fali [MPa]
1	705,4	11	tak (po odbiciu)	tak	5
2	671,8	36	nie	tak	3,6
3	677,6	12,5	nie	tak	3,7
4	716,2	16	nie	tak	4,9
5	875,6	1	tak (w narożu)	nie	13,5
6	754,6	4	tak (po odbiciu)	tak	7,6

Po przeprowadzeniu 6 eksperymentów dla mieszaniny o stężeniu 35% można wyciągnąć następujące wnioski. Odnotowano 2 przejścia do detonacji po pewnym czasie po odbiciu od naroża oraz jedno w narożu. Zakres ciśnienia odnotowanych w narożu wynosi 3,6 – 7,6 MPa oraz 13,5 MPa w przypadku detonacji w narożu. Minimalna prędkość fali ciśnieniowej w chwili odbicia w naroże jest równa 671,8 m/s (IDT = 36 us), a najwyższa 875,6 m/s (detonacja w narożu).

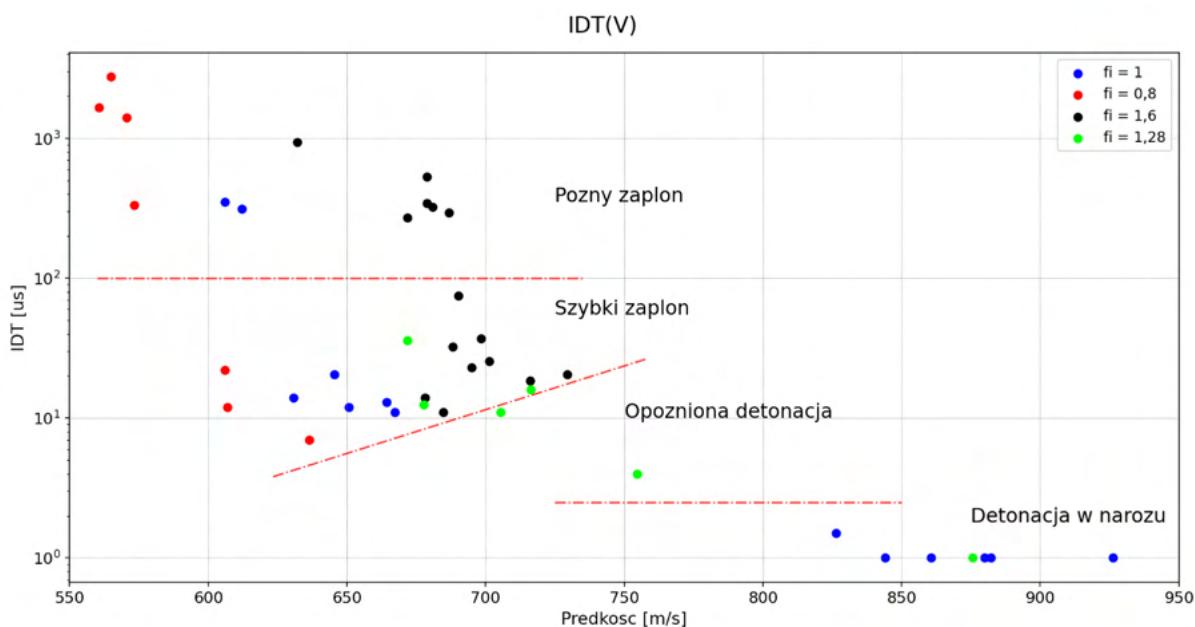


Rysunek 205 Wykres opóźnienia zapłonu w funkcji prędkości fali ciśnieniowej ( $\Phi = 1,28$ )

Na podstawie wykresu można stwierdzić, że dla prędkości w zakresie od 675 m/s do 717 m/s, IDT wynosi od 10 do 16 us. Dla prędkości poniżej 672 m/s, IDT wynosi 35 us wzwyż. Dla prędkości powyżej 750 m/s, IDT w zakresie 1-4 us.

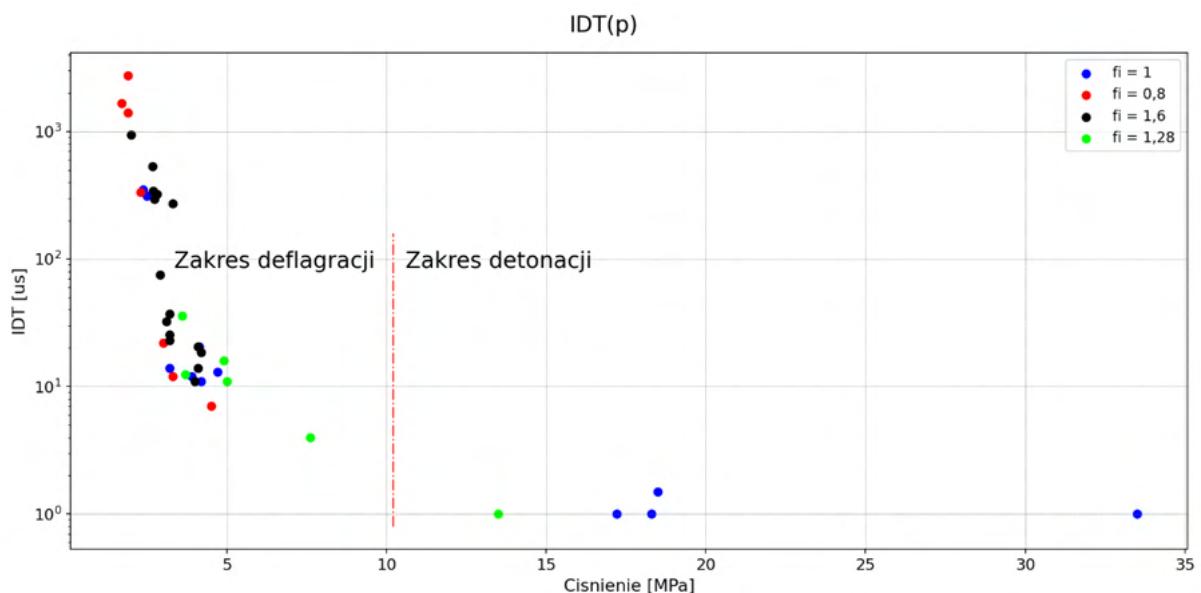
## 6. Wnioski

Po przeprowadzeniu 44 bazowych eksperymentów mieszaniny wodorowo-powietrznej o różnych stężeniach można wyciągnąć następujące wnioski. Wpływ konfiguracji sekcji napędzającej na prędkość deflagracji był w dużej mierze nieprzewidywalny. Dla bardzo zbliżonych warunków i konfiguracji sekcji napędzającej otrzymywano często odmienne wyniki – przykład mieszaniny wodorowo-powietrznej o współczynniku ekwiwalencji  $\phi = 1,28$ , dla której wykonano 6 eksperymentów w tej samej konfiguracji stanowiska, a otrzymano dwie detonacje poza narożem, jedną detonację w narożu oraz trzy przykłady deflagracji z opóźnionym zapłonem. Podsumowanie wyników pomiarów zaprezentowano na poniższych wykresach.



Rysunek 206 Wykres zbiorczy opóźnienia zapłonu od prędkości uderzenia fali w naroże dla wszystkich mieszanin

Na wykresie (rys. 206) przedstawiono na skali logarytmicznej opóźnienie zapłonu w funkcji prędkości uderzenia fali ciśnieniowej w naroże. Na podstawie otrzymanych wyników skategoryzowano uzyskane przypadki zapłonów. Zdecydowanie największa grupa punktów zawierająca wszystkie mieszaniny mieści się w zakresie IDT 5-100 us oraz w granicach prędkości 600-750 m/s – dla tych przypadków zachodziła deflagracja z zapłonem oznaczonym umownie jako ‘szybki zapłon’. Następnie wyróżnia się grupa punktów, dla których IDT znalazło się w przedziale około 100-3000 us, a prędkości mieściły się w zakresie 550-700 m/s – są to przypadki bardziej opóźnionego zapłonu sklasyfikowanego umownie jako ‘późny zapłon’. IDT o wartości między 0-2 us, a także wyraźnie większych prędkościach wyższych od 800 m/s, to przypadki przejścia do detonacji w narożu. Obserwuje się w przybliżeniu wykładniczy spadek wartości IDT wraz ze wzrostem prędkości. Na wykresie pominięto przypadki przedwczesnej detonacji.



Rysunek 207 Wykres zbiorczy opóźnienia zapłonu od ciśnienia w narożu w chwili uderzenia fali ciśnieniowej

Wykres zbiorczy IDT w funkcji ciśnienia w narożu w chwili uderzenia w naroże fali ciśnieniowej (rys. 207) przedstawia wyraźny podział wyników na przypadki deflagracji i detonacji. Wartości ciśnień panujących w narożu dla deflagracji są wyraźnie niższe niż w przypadku detonacji i mieścią się w zakresie poniżej 10 MPa, jednocześnie dla deflagracji wartość IDT jest wyraźnie większa i wynosi 7-1404 us. Ciśnienie dla zjawiska detonacji jest w zakresie 13,5-33,3 MPa (maksymalny zakres czujnika ciśnienia), natomiast wartości IDT są poniżej 2 us. Na rysunku 207 celowo nie uwzględniono przypadków przedwczesnej detonacji z tego powodu, że wartości ciśnienia w narożu po odbiciu stabilnie propagującej detonacji są nieistotne z punktu widzenia głównego celu badań.



Rysunek 208 Wykres zbiorczy opóźnienia zapłonu w funkcji stężenia badanej mieszaniny

Na podstawie rysunku 208 można stwierdzić następujące wnioski. Zgodnie z przewidywaniami dla mieszaniny stechiometrycznej ( $\phi = 1$ ) nastąpiło najczęściej zjawisk przejścia do detonacji w

narożu, co przedstawia ją jako mieszaninę najbardziej podatną na przejście do detonacji spośród wszystkich badanych. Można wywnioskować, że dla mieszaniny 40% ( $\phi = 1,6$ ) przejście do mieszaniny jest zjawiskiem dużo rzadszym, pomimo największej liczby eksperymentów (16) na niej wykonanej, co cechuje tę mieszaninę jako mieszaninę mniej podatną na detonację. Mieszanina o zawartości wodoru 25% ( $\phi = 0,8$ ), podobnie jak mieszanina o zawartości wodoru 40%, jest mniej detonacyjna, jednak warty odnotowania jest fakt, że liczba eksperymentów dla tej mieszaniny była istotnie mniejsza (8 eksperymentów). Mieszanina 35% wodoru ( $\phi = 1,28$ ) zaliczona została do mieszanin podatnych na detonację, spośród 6 wykonanych eksperymentów w 3 zaobserwowano zjawisko przejścia do detonacji (jedno w narożu, dwa poza narożem). Ogólnym kryterium pojawienia się detonacji w zakresie przebadanych mieszanin wydaje się być doprowadzenie mieszaniny palnej do takich parametrów ciśnienia i temperatury, aby IDT był na poziomie 10 us lub mniejszym (rys. 206 i rys. 208). Oczywiście IDT zależy od reaktywności mieszaniny, a tym samym minimalna prędkość wiodącej fali uderzeniowej prowadzącej do detonacji po odbiciu w narożu będzie musiała rosnąć wraz ze zmniejszaniem się stopnia reaktywności mieszaniny. Prędkość ta zatem powinna osiągnąć minimum dla mieszaniny najbardziej reaktywnej. Na podstawie rys. 206 i pomiarów dla mieszaniny stochiometrycznej można wstępnie oszacować wartość tej prędkości na poziomie 675-700 m/s. Podobna wartość ( $>700$  m/s) występuje dla mieszaniny o stężeniu wodoru 35% ( $\phi = 1,28$ ). Dla pozostałych mieszanin nie zaobserwowano przejścia do detonacji w narożu lub opóźnionej detonacji po odbiciu, więc niemożliwe jest bardziej dokładne określenie wartości krytycznej prędkości bez przeprowadzenia dalszych badań.

## Bibliografia

- [1] John H. S. Lee, *The Detonation Phenomenon*, Cambridge University Press, (2008)
- [2] W. Fickett & W. C. Davis, *Detonation Theory and Experiment*, Dover Publications, (2011)
- [3] Kevin P. Grogan, S. Scott Goldsborough, Matthias Ihme, *Mild Ignition Phenomena in Rapid Compression Machines*, 25th ICDERS, 2–7, (2015)
- [4] A.M. Bartenev, S.V. Khomik, B.E. Gelfand, H. Gronig, H. Olivier, *Effect of reflection type on detonation initiation at shock-wave focusing*, Shock Waves volume 10, issue 3, (2000)
- [5] G. Ciccarelli · B. de Witt, *Detonation initiation by shock reflection from an orifice plate*, Shock Waves volume 15, issue 3-4, (2006)
- [6] G. Ciccarelli, S. Dorohee, *Flame acceleration and transition to detonation in ducts*, Progress in Energy and Combustion Science volume 34, issue 4, (2008)
- [7] Y. B. Zeldovich, B. E. Gelfand, S. A. Tsyganov, *Concentration and Temperature Nonuniformities of Combustible Mixtures as Reason for Pressure Waves Generation*, by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, (1988)
- [8] Huahua Xiaoa, Elaine S. Oran, *Shock focusing and detonation initiation at a flame front*, Combustion and Flame volume 203, 397-406, (2019)
- [9] Xinmeng Tang, Edyta Dziemińska, A. Koichi Hayashi, Nobuyuki Tsuboi *Gradient mechanism on the onset of detonation in the deflagration to detonation transition*, 27th ICDERS July 28th – August 2nd, (2019)
- [10] Vadim N. Gamezo, Christian L. Bachman, Elaine S. Oran, *Flame acceleration and DDT in large-scale obstructed channels filled with methane-air mixtures*, Proceedings of the Combustion Institute, Volume 38, Issue 3, 3521-3528, (2021)
- [11] Mitchell Cross, Gaby Ciccarelli, *DDT and detonation propagation limits in an obstacle filled tube*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, volume 36, 380-386, (2015)
- [12] Peng, Han, Huang, *Effects of jet in crossflow on flame acceleration and deflagration to detonation transition in methane–oxygen mixture*, Combustion and Flame, Volume 198, 2018, 69-80, (2018)
- [13] M.R. Baer, J.W. Nunziato , *A Two-phase mixture theory for the deflagration-to-detonation transition (DDT) in reactive granular materials*, Volume 12, Issue 6, 861-889, (1986)
- [14] A. K. Kapila, D. W. Schwendeman, *Mechanisms of Detonation Formation due to a Temperature Gradient*, Combustion Theory and Modelling, volume 6, 553, (2002)
- [15] D. R. Kirk, *MAE 5310: COMBUSTION FUNDAMENTALS*, Mechanical and Aerospace Engineering Department; Florida Institute of Technology
- [16] Yi-du Hong, Bai-quan Lin and Chuan-jie Zhu, *Premixed methane/air gas deflagration simulations in closed-end and open-end tubes*, International Journal of Spray and Combustion Dynamics, volume 8, issue 4, 271-284, (2016)
- [17] Archiwum Politechniki École
- [18] E. J. Bowen, Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society, (1958)
- [19] Archiwa AIP Emilio Segré Visual

[20] Strona internetowa poświęcona chemii.

<https://www.worldofchemicals.com/511/chemistry-articles/pierre-eugene-marcellin-berthelot-formulator-of-thomsen-berthelot-principle.html> [dostęp 19.01.2022]

[21] Strona internetowa

[https://zsidomagyarak.blog.hu/2014/04/15/zsido\\_magyarok\\_akikre\\_buszkek\\_vagyunk\\_823](https://zsidomagyarak.blog.hu/2014/04/15/zsido_magyarok_akikre_buszkek_vagyunk_823)  
[dostęp 20.01.2022]

## Wykaz symboli i skrótów:

$\rho_1$  – gęstość gazów przed falą uderzeniową

$p_1$  - ciśnienie gazów przed falą uderzeniową

$u_1$  – prędkość przepływu przed falą uderzeniową

$h_1$  – entalpia przed falą uderzeniową

$a_1$  – prędkość dźwięku ośrodka przed falą uderzeniową

$v_1$  – objętość właściwa przed falą uderzeniową

$\rho_2$  – gęstość gazów za falą uderzeniową

$p_2$  - ciśnienie gazów za falą uderzeniową

$u_2$  – prędkość przepływu za falą uderzeniową

$h_2$  – entalpia przed falą za uderzeniową

$a_2$  – prędkość dźwięku ośrodka za falą uderzeniową

$v_2$  – objętość właściwa za falą uderzeniową

$U$  – prędkość prostopadłej fali uderzeniowej

$\dot{m}$  – wydatek masy przepływu

$k$  – wykładnik adiabaty

$c_p$  – ciepło właściwie w przemianie izobarycznej

$c_V$  – ciepło właściwie w przemianie izochorycznej

$U_D$  – prędkość fali detonacyjnej CJ

$U_E$  – prędkość fali deflaguracyjnej CJ

$c_{p1}$  - ciepło właściwie w przemianie izobarycznej przed falą uderzeniową

$T_1$  – temperatura ośrodka przed falą uderzeniową

$k_1$  – wykładnik adiabaty dla gazu przed falą uderzeniową

$\Phi$  – współczynnik ekwiwalencji

$(\frac{F}{A})_{\text{stoich}}$  – stosunek paliwa do powietrza mieszanki stochiometrycznej

$(\frac{F}{A})$  – stosunek paliwa do powietrza mieszanki

$p_0$  – ciśnienie w warunkach początkowych

$T_0$  – temperatura w warunkach początkowych

$t_3$  - opóźnienie reakcji zapisu kart pomiarowych względem inicjacji iskry

$t_i$  – czas aktywacji czujnika i

$x_i$  – odległość do czujnika i

$v_{CJ}$  – prędkość detonacji Chapmana-Jougueta

$a_p$  – prędkość dźwięku spalin

$\beta$  - stosunek molowy azotu do tlenu

$Q$  – energia dostarczona

DDT – ang. deflagration to detonation transition

ToA – ang. time of arrival

IDT – ang. ignition delay time

CJ – Chapman-Jouguet

SWACER ang. shock wave amplification by coherent energy release

## Spis rysunków:

Rysunek 1 Kolejno od lewej: Marcellin Berthelot [20], Jacques Jouguet [17], David Champan [18] .....	3
Rysunek 2 kolejno od lewej: Yakov Zeldovich [19], John von Neumann [21].....	4
Rysunek 3 jednowymiarowy przepływ ustalony z prostopadłą falą uderzeniową.....	4
Rysunek 4 wykres przedstawiający krzywą Rankine'a-Hugoniota (linia ciągła) oraz linie Rayleigha – Michelsona (linia przerywana styczna do ciągłej) [15] .....	6
Rysunek 5 Zakres rozwiązań deflagracji i detonacji [1] .....	6
Rysunek 6 Deflagracja rozprzestrzeniająca się w zamkniętej rurze [16].....	8
Rysunek 7 Rozprzestrzeniający się płomień po fali uderzeniowej w gładkiej rurze [1].....	8
Rysunek 8 wzmacnianie ciśnień powodujące detonację w obszarze energii krytycznej przy użyciu mechanizmu SWACER (strzałka wskazuje lokalizację strefy reakcji) [1] .....	8
Rysunek 9 Propagacja płomienia przez przeszkodę; początek detonacji [1] .....	9
Rysunek 10 Kolejno od lewej: Początkowa faza przyspieszania płomienia po zapłonie, późniejsze etapy przyspieszania płomienia. [1].....	9
Rysunek 11 Diagram zależności geometrii reflektora w funkcji padania fali uderzeniowej [4] .....	10
Rysunek 12 inicjacja detonacji w reflektorze parabolicznym [4].....	11
Rysunek 13 wykres liczby Macha fali uderzeniowej dla różnych konfiguracji sekcji badawczej w funkcji $\beta$ [5].....	12
Rysunek 14 schemat stanowiska badawczego konfiguracja 1 .....	14
Rysunek 15 schemat stanowiska badawczego konfiguracja 2 .....	14
Rysunek 16 stanowisko badawcze konfiguracja 1 .....	15
Rysunek 17 stanowisko badawcze konfiguracja 2 .....	15
Rysunek 18 wnętrze rury detonacyjnej.....	16
Rysunek 19 naroże skupiące .....	16
Rysunek 20 sekcja napędzające różne konfiguracje .....	17
Rysunek 21 butle gazowe przy stanowisku badawczym .....	17
Rysunek 22 listwa rozdzielająca przepływ gazu .....	18
Rysunek 23 od lewej: czujnik ciśnienia oraz sonda jonizacyjna zamontowane do rury detonacyjnej.....	18
Rysunek 24 pompa próżniowa .....	19
Rysunek 25 komputer zbierający dane pomiarowe .....	19
Rysunek 26 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych .....	24
Rysunek 27 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej.....	24
Rysunek 28 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA .....	25
Rysunek 29 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia ...	25
Rysunek 30 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych .....	26
Rysunek 31 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej.....	26
Rysunek 32 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA .....	27
Rysunek 33 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia ...	27
Rysunek 34 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych .....	28
Rysunek 35 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej.....	28
Rysunek 36 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA .....	29
Rysunek 37 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia ...	29
Rysunek 38 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych .....	30

Rysunek 39 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej.....	30
Rysunek 40 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA.....	31
Rysunek 41 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia...	31
Rysunek 42 Eksperyment 5 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych .....	32
Rysunek 43 Eksperyment 5 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej.....	32
Rysunek 44 ( $\Phi = 1$ ) Eksperyment 5 wykres ToA.....	33
Rysunek 45 Eksperyment 5 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia ...	33
Rysunek 46 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych .....	34
Rysunek 47 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej.....	34
Rysunek 48 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA.....	35
Rysunek 49 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia ...	35
Rysunek 50 Eksperyment 7 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciagleń i sond jonizacyjnych .....	36
Rysunek 51 Eksperyment 7 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej.....	36
Rysunek 52 Eksperyment 7 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA.....	37
Rysunek 53 Eksperyment 7 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia...	37
Rysunek 54 Eksperyment 8 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciagleń i sond jonizacyjnych .....	38
Rysunek 55 Eksperyment 8 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej.....	38
Rysunek 56 Eksperyment 8 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA.....	39
Rysunek 57 Eksperyment 8 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia ...	39
Rysunek 58 Eksperyment 9 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciagleń i sond jonizacyjnych .....	40
Rysunek 59 Eksperyment 9 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej.....	40
Rysunek 60 Eksperyment 9 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA.....	41
Rysunek 61 Eksperyment 9 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia ...	41
Rysunek 62 Eksperyment 10 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciagleń i sond jonizacyjnych .....	42
Rysunek 63 Eksperyment 10 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej.....	42
Rysunek 64 Eksperyment 10 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA.....	43
Rysunek 65 Eksperyment 10 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .	43
Rysunek 66 Eksperyment 11 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciagleń i sond jonizacyjnych .....	44
Rysunek 67 Eksperyment 11 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej.....	44
Rysunek 68 Eksperyment 11 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA.....	45
Rysunek 69 Eksperyment 11 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .	45
Rysunek 70 Eksperyment 12 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciagleń i sond jonizacyjnych .....	46
Rysunek 71 Eksperyment 12 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej.....	46
Rysunek 72 Eksperyment 12 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA.....	47
Rysunek 73 Eksperyment 12 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .	47
Rysunek 74 Eksperyment 13 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciagleń i sond jonizacyjnych .....	48
Rysunek 75 Eksperyment 13 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej.....	48
Rysunek 76 Eksperyment 13 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA.....	49
Rysunek 77 Eksperyment 13 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .	49
Rysunek 78 Eksperyment 14 ( $\Phi = 1$ ) przebiegi czujników ciagleń i sond jonizacyjnych .....	50
Rysunek 79 Eksperyment 14 ( $\Phi = 1$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej.....	50
Rysunek 80 Eksperyment 14 ( $\Phi = 1$ ) wykres ToA.....	51
Rysunek 81 Eksperyment 14 ( $\Phi = 1$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .	51
Rysunek 82 wykres opóźnienia zapłonu w zależności od prędkości fali ciśnieniowej .....	53
Rysunek 83 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1, 6$ ) przebiegi czujników ciagleń i sond jonizacyjnych .....	55
Rysunek 84 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1, 6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	55
Rysunek 85 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1, 6$ ) wykres ToA .....	56

Rysunek 86 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia	56
Rysunek 87 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1,6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych .....	57
Rysunek 88 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	57
Rysunek 89 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA .....	58
Rysunek 90 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia	58
Rysunek 91 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1,6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych .....	59
Rysunek 92 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	59
Rysunek 93 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA .....	60
Rysunek 94 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia	60
Rysunek 95 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1,6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych .....	61
Rysunek 96 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	61
Rysunek 97 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA .....	62
Rysunek 98 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia	62
Rysunek 99 Eksperyment 5 ( $\Phi = 1,6$ ) przebiegi czujników ciagleń i sond jonizacyjnych .....	63
Rysunek 100 Eksperyment 5 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	63
Rysunek 101 Eksperyment 5 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA.....	64
Rysunek 102 Eksperyment 5 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	64
Rysunek 103 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1,6$ ) przebiegi czujników ciagleń i sond jonizacyjnych ...	65
Rysunek 104 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	65
Rysunek 105 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA.....	66
Rysunek 106 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	66
Rysunek 107 Eksperyment 7 ( $\Phi = 1,6$ ) przebiegi czujników ciagleń i sond jonizacyjnych ...	67
Rysunek 108 Eksperyment 7 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	67
Rysunek 109 Eksperyment 7 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA.....	68
Rysunek 110 Eksperyment 7 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	68
Rysunek 111 Eksperyment 8 ( $\Phi = 1,6$ ) przebiegi czujników ciagleń i sond jonizacyjnych ...	69
Rysunek 112 Eksperyment 8 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	69
Rysunek 113 Eksperyment 8 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA.....	70
Rysunek 114 Eksperyment 8 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	70
Rysunek 115 Eksperyment 9 ( $\Phi = 1,6$ ) przebiegi czujników ciagleń i sond jonizacyjnych ...	71
Rysunek 116 Eksperyment 9 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	71
Rysunek 117 Eksperyment 9 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA.....	72
Rysunek 118 Eksperyment 9 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	72
Rysunek 119 Eksperyment 10 ( $\Phi = 1,6$ ) przebiegi czujników ciagleń i sond jonizacyjnych .	73
Rysunek 120 Eksperyment 10 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	73
Rysunek 121 Eksperyment 10 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA.....	74
Rysunek 122 Eksperyment 10 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	74
Rysunek 123 Eksperyment 11 ( $\Phi = 1,6$ ) przebiegi czujników ciagleń i sond jonizacyjnych .	75
Rysunek 124 Eksperyment 11 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	75
Rysunek 125 Eksperyment 11 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA.....	76

Rysunek 126 Eksperyment 11 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	76
Rysunek 127 Eksperyment 12 ( $\Phi = 1,6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych .....	77
Rysunek 128 Eksperyment 12 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	77
Rysunek 129 Eksperyment 12 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA .....	78
Rysunek 130 Eksperyment 12 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	78
Rysunek 131 Eksperyment 13 ( $\Phi = 1,6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych .....	79
Rysunek 132 Eksperyment 13 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	79
Rysunek 133 Eksperyment 13 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA .....	80
Rysunek 134 Eksperyment 13 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	80
Rysunek 135 Eksperyment 14 ( $\Phi = 1,6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych .....	81
Rysunek 136 Eksperyment 14 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	81
Rysunek 137 Eksperyment 14 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA .....	82
Rysunek 138 Eksperyment 14 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	82
Rysunek 139 Eksperyment 15 ( $\Phi = 1,6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych .....	83
Rysunek 140 Eksperyment 15 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	83
Rysunek 141 Eksperyment 15 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA .....	84
Rysunek 142 Eksperyment 15 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	84
Rysunek 143 Eksperyment 16 ( $\Phi = 1,6$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych .....	85
Rysunek 144 Eksperyment 16 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	85
Rysunek 145 Eksperyment 16 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres ToA .....	86
Rysunek 146 Eksperyment 16 ( $\Phi = 1,6$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	86
Rysunek 147 Wykres opóźnienia zapłonu w funkcji prędkości fali ciśnieniowej ( $\Phi = 1,6$ ) ...	88
Rysunek 148 Eksperyment 1 ( $\Phi = 0,8$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych ...	90
Rysunek 149 Eksperyment 1 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	90
Rysunek 150 Eksperyment 1 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres ToA .....	91
Rysunek 151 Eksperyment 1 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	91
Rysunek 152 Eksperyment 2 ( $\Phi = 0,8$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych ...	92
Rysunek 153 Eksperyment 2 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	92
Rysunek 154 Eksperyment 2 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres ToA .....	93
Rysunek 155 Eksperyment 2 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	93
Rysunek 156 Eksperyment 3 ( $\Phi = 0,8$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych ...	94
Rysunek 157 Eksperyment 3 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	94
Rysunek 158 Eksperyment 3 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres ToA .....	95
Rysunek 159 Eksperyment 3 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	95
Rysunek 160 Eksperyment 4 ( $\Phi = 0,8$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych ...	96
Rysunek 161 Eksperyment 4 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	96
Rysunek 162 Eksperyment 4 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres ToA .....	97

Rysunek 163 Eksperyment 4 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	97
Rysunek 164 Eksperyment 5 ( $\Phi = 0,8$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych ...	98
Rysunek 165 Eksperyment 5 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	98
Rysunek 166 Eksperyment 5 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres ToA.....	99
Rysunek 167 Eksperyment 5 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	99
Rysunek 168 Eksperyment 6 ( $\Phi = 0,8$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych .	100
Rysunek 169 Eksperyment 6 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	100
Rysunek 170 Eksperyment 6 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres ToA.....	101
Rysunek 171 Eksperyment 6 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	101
Rysunek 172 Eksperyment 7 ( $\Phi = 0,8$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych .	102
Rysunek 173 Eksperyment 7 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	102
Rysunek 174 Eksperyment 7 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres ToA.....	103
Rysunek 175 Eksperyment 7 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	103
Rysunek 176 Eksperyment 8 ( $\Phi = 0,8$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych .	104
Rysunek 177 Eksperyment 8 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	104
Rysunek 178 Eksperyment 8 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres ToA.....	105
Rysunek 179 Eksperyment 8 ( $\Phi = 0,8$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	105
Rysunek 180 Wykres opóźnienia zapłonu w funkcji prędkości fali ciśnieniowej ( $\Phi = 0,8$ )	107
Rysunek 181 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1,28$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych	109
Rysunek 182 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	109
Rysunek 183 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres ToA .....	110
Rysunek 184 Eksperyment 1 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	110
Rysunek 185 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1,28$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych	111
Rysunek 186 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	111
Rysunek 187 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres ToA .....	112
Rysunek 188 Eksperyment 2 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	112
Rysunek 189 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1,28$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych	113
Rysunek 190 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	113
Rysunek 191 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres ToA .....	114
Rysunek 192 Eksperyment 3 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	114
Rysunek 193 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1,28$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych	115
Rysunek 194 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	115
Rysunek 195 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres ToA .....	116
Rysunek 196 Eksperyment 4 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	116
Rysunek 197 Eksperyment 5 ( $\Phi = 1,28$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych	117
Rysunek 198 Eksperyment 5 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	117
Rysunek 199 Eksperyment 5 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres ToA .....	118

Rysunek 200 Eksperyment 5 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	118
Rysunek 201 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1,28$ ) przebiegi czujników ciśnień i sond jonizacyjnych.....	119
Rysunek 202 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres zbiorczy propagacji fali ciśnieniowej .....	119
Rysunek 203 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres ToA .....	120
Rysunek 204 Eksperyment 6 ( $\Phi = 1,28$ ) wykres prędkości fali ciśnieniowej i frontu płomienia .....	120
Rysunek 205 Wykres opóźnienia zapłonu w funkcji prędkości fali ciśnieniowej ( $\Phi = 1,28$ ).....	122
Rysunek 206 Wykres zbiorczy opóźnienia zapłonu od prędkości uderzenia fali w naroże dla wszystkich mieszanin.....	123
Rysunek 207 Wykres zbiorczy opóźnienia zapłonu od ciśnienia w narożu w chwili uderzenia fali ciśnieniowej.....	124
Rysunek 208 Wykres zbiorczy opóźnienia zapłonu w funkcji stężenia badanej mieszaniny.....	124

### Spis tabel:

Tabela 1 przykładowe wartości prędkości detonacji CJ wyliczone w programie Gaseq.....	7
Tabela 2 zestawienie wykonanych eksperymentów .....	21
Tabela 3 konfiguracje sekcji napędzającej mieszaniny $\Phi = 1$ .....	23
Tabela 4 zestawienie wyników eksperymentów mieszaniny $\Phi = 1$ .....	52
Tabela 5 konfiguracje sekcji napędzającej mieszaniny $\Phi = 1,6$ .....	54
Tabela 6 zestawienie wyników eksperymentów mieszaniny $\Phi = 1,6$ .....	87
Tabela 7 konfiguracje sekcji napędzającej mieszaniny $\Phi = 0,8$ .....	89
Tabela 8 zestawienie wyników eksperymentów $\Phi = 0,8$ .....	106
Tabela 9 konfiguracje sekcji napędzającej mieszaniny $\Phi = 1,28$ .....	108
Tabela 10 zestawienie wyników eksperymentów mieszaniny $\Phi = 1,28$ .....	121

### Spis załączników:

1. Skrypt w języku python.

załącznik 1:

```
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.pyplot import cm
import numpy as np
import pandas as pd
import seaborn as sns
import scipy
import re
from matplotlib.lines import Line2D

#####
##### WCZYTANIE DANYCH O CZUJNIKACH #####
#####

xxx = pd.read_csv("https://raw.githubusercontent.com/RusieckiFilip/PracaInz/main/VMPA.csv", sep = ";")

for i in xxx["SN"]:
    if type(i)==int:
        i = str(i)

#####
##### FUNKCJA WCZYTANIA DANYCH #####
#####

def wczytanie_danych(nazwa_pliku, nazwa_folderu, kanal=0):
    data = pd.read_csv("https://raw.githubusercontent.com/RusieckiFilip/PracaInz/main/" +
                       nazwa_folderu+"/H2-pow_fi1/"+nazwa_pliku, sep = ";")

    #### USUWANIE SZUMU #####
    if kanal != 0:
        i=0
        for j in data[kanal]:
            if data[kanal][i] > 0.45:
                data[kanal] = data[kanal].drop(labels=list(range(i,31999)), axis=0)
                break
            i+=1
        for i in data:
            j=0
            for k in data[i]:
                if i != "time [us]" and j < 2000:
                    data[i][j]=0
                else: break
                j+=1
    return data

#####
##### WCZYTANIE DANYCH #####
#####

# data1 = wczytanie_danych("test1.csv","TESTY_H2-pow_fi1_091121","ch 3")
# text1 = wczytanie_danych("test1_t.csv","TESTY_H2-pow_fi1_091121")
```

```
# data2 = wczytanie_danych("test2.csv","TESTY_H2-pow_fi1_091121","ch 3")
# text2 = wczytanie_danych("test2_t.csv","TESTY_H2-pow_fi1_091121")

# data3 = wczytanie_danych("test3.csv","TESTY_H2-pow_fi1_091121","ch 3")
# text3 = wczytanie_danych("test3_t.csv","TESTY_H2-pow_fi1_091121")

# data4 = wczytanie_danych("test4.csv","TESTY_H2-pow_fi1_091121","ch 3")
# text4 = wczytanie_danych("test4_t.csv","TESTY_H2-pow_fi1_091121")

# data5 = wczytanie_danych("test5.csv","TESTY_H2-pow_fi1_091121","ch 3")
# text5 = wczytanie_danych("test5_t.csv","TESTY_H2-pow_fi1_091121")

# data6 = wczytanie_danych("test6.csv","TESTY_H2-pow_fi1_091121","ch 3")
# text6 = wczytanie_danych("test6_t.csv","TESTY_H2-pow_fi1_091121")

# data7 = wczytanie_danych("Exp_07.csv","testy_H2-pow_fi1_061221","ch 3")
# text7 = wczytanie_danych("Exp_07_t.csv","testy_H2-pow_fi1_061221")

# data8 = wczytanie_danych("Exp_08.csv","testy_H2-pow_fi1_061221","ch 3")
# text8 = wczytanie_danych("Exp_08_t.csv","testy_H2-pow_fi1_061221")

# data9 = wczytanie_danych("Exp_05.csv","testy_H2-pow_fi08_061221","ch 3")
# text9 = wczytanie_danych("Exp_05_t.csv","testy_H2-pow_fi08_061221")

# data10 = wczytanie_danych("Exp_06.csv","testy_H2-pow_fi08_061221","ch 3")
# text10 = wczytanie_danych("Exp_06_t.csv","testy_H2-pow_fi08_061221")

# data11 = wczytanie_danych("Exp_07.csv","testy_H2-pow_fi08_071221","ch 3")
# text11 = wczytanie_danych("Exp_07_t.csv","testy_H2-pow_fi08_071221")

# data12 = wczytanie_danych("Exp_08.csv","testy_H2-pow_fi08_071221","ch 3")
# text12 = wczytanie_danych("Exp_08_t.csv","testy_H2-pow_fi08_071221")

# data13 = wczytanie_danych("Exp_09.csv","testy_H2-pow_fi1_13122021","ch 3")
# text13 = wczytanie_danych("Exp_09_t.csv","testy_H2-pow_fi1_13122021")

# data14 = wczytanie_danych("Exp_010.csv","testy_H2-pow_fi1_13122021","ch 3")
# text14 = wczytanie_danych("Exp_010_t.csv","testy_H2-pow_fi1_13122021")

# data15 = wczytanie_danych("Exp_011.csv","testy_H2-pow_fi1_13122021","ch 3")
# text15 = wczytanie_danych("Exp_011_t.csv","testy_H2-pow_fi1_13122021")

# data16 = wczytanie_danych("Exp_01.csv","testy_H2-pow_fi16_13122021","ch 3")
# text16 = wczytanie_danych("Exp_01_t.csv","testy_H2-pow_fi16_13122021")

# data17 = wczytanie_danych("Exp_02.csv","testy_H2-pow_fi16_13122021","ch 3")
# text17 = wczytanie_danych("Exp_02_t.csv","testy_H2-pow_fi16_13122021")

# data18 = wczytanie_danych("Exp_03.csv","testy_H2-pow_fi16_13122021","ch 3")
# text18 = wczytanie_danych("Exp_03_t.csv","testy_H2-pow_fi16_13122021")

# data19 = wczytanie_danych("Exp_04.csv","testy_H2-pow_fi16_13122021","ch 3")
# text19 = wczytanie_danych("Exp_04_t.csv","testy_H2-pow_fi16_13122021")
```

```
# data20 = wczytanie_danych("test1.csv","TESTY-H2-pow_fi08_101121","ch 3")
# text20 = wczytanie_danych("test1_t.csv","TESTY-H2-pow_fi08_101121")
```

##### FUNKCJA TWORZACA WYKRESY #####

```

def funkcja(data1,text1,numer,tr_SN, tr_SN_f2, tr_SJ, tr_SN2, czas_zbior, V_max,V_CJ,aP,t_d):

##### TWORZENIE KOPII #####
data = data1[:]

##### Obliczanie TOA_P dla kanałow bez sond jonizacyjnych #####
temp = []
l = -1
for i in data1:
    if i != "time [us]" and l < 2:
        k = -1
        for j in data1[i]:
            k += 1
            if data1[i][k] > tr_SN2:
                temp.append(data1["time [us]"][k]/1000)
                break
        l += 1

```

####

```
list1=[]
for i in text1["Tabela"]:
    l=0
    for j in xxx["SN"]:
        if j in i:
            print("Czujnik: "
                  list1.append(xxx)
    l+=1
```

```
##### Pobieranie wspolrzednych i opisow #####
pattern = "\](.*?)\["
```

```
list2=[]
print("\n")
l=0
```

```
# Zczytanie pozycji z czujnika
for i in text1["Tabela"]:
    if i != "time [us]":
        if "POS" in i:
            substring = re.search(pattern, i).group(1)
            list2.append(float(substring))
```

```

# Zczytanie opisu eksperymentu
for i in text1["Tabela"]:
    if i != "time [us]":
        if "[EXP_DESC_s]" in i:
            opis = i
            break

for i in text1["Tabela"]:
    if i != "time [us]":
        if "/EXP_DESC_s" in i:
            opis = opis + " " + i
            break
    opis = re.search(pattern, opis).group(1)

##### TWORZENIE DATAFRAME Z DANYMI CZUJNIKOW #####
#####
d = {'Kanal': range(1,9), 'VPMA': list1, "Odleglosc": list2[:8]}
df1 = pd.DataFrame(data=d)

l=-1

##### PRZELICZENIE NA MPa CZUJNIKOW #####
for i in data1:
    if i != "time [us]" and l < 8:
        data1[i] = data1[i]/df1["VPMA"][l]+0.1
    l+=1
#####

##### WYKRES ODCZYTÓW CZUJNIKÓW #####
#
fig1 = plt.figure("data" + numer, figsize=(16, 9), dpi=150)
plt.clf()

fig1.suptitle(opis, fontsize=20)

ax1=plt.subplot(211)
plt.style.use('seaborn-deep')
plt.xlabel("Czas [us]", fontsize=15)
plt.ylabel("P [MPa]", fontsize=15)
plt.grid(color='#717171', linestyle='--', linewidth=0.3)
#plt.ylim(0,2.5)
plt.xlim(2000,t_d)
color = cm.rainbow(np.linspace(0, 1, 8))
for i,c in zip(range(1,9),color):
    plt.plot(data1["time [us]"],data1["ch "+ str(i)], linewidth=1.5, label = "ch"+ str(i) + " SN", c=c)
    plt.legend(loc="upper left", fontsize=11)
    plt.tick_params(axis='both', labelsize=14)

ax1=plt.subplot(212)
plt.style.use('seaborn-deep')
plt.xlabel("Czas [us]", fontsize=15)

```

```

plt.ylabel("U [V]", fontsize=15)
plt.grid(color='#717171', linestyle='--', linewidth=0.3)
plt.ylim(0,1)
plt.xlim(2000,t_d)
for i in range(1,15):
    if i > 8:
        plt.plot(data1["time [us]"],data1["ch "+ str(i)], linewidth=1.5, label = "ch"+ str(i) + " SJ", c=color[i-7] )
plt.legend(loc="upper left", fontsize=11)
plt.tick_params(axis='both', labelsize=14)

plt.tight_layout()

list3=temp
list4=[0.1,4]
l=-1

##### WYKRES ZBIORCZY #####
fig4 = plt.figure("Zbiorczy" + numer, figsize=(16, 9), dpi=150)
plt.clf()

fig4.suptitle(opis, fontsize=20)
zbiorczy = plt.subplot(111)

plt.style.use('seaborn-deep')
plt.xlabel("Czas [us]", fontsize=15)
plt.ylabel("P[MPa] + x[m]", fontsize=15)
plt.grid(color='#717171', linestyle='--', linewidth=0.3)
# plt.ylim(0,2.5)
plt.xlim(2000,t_d)
color = cm.rainbow(np.linspace(0, 1, 8))
for i, c in zip(range(1,9),color):
    plt.plot(data1["time [us]"],data1["ch "+ str(i)] + df1["Odlegosc"][i-1],
              linewidth=1, label = "ch"+ str(i) + " SN, " + str(df1["Odlegosc"][i-1])+" m", c=c)
plt.tick_params(axis='both', labelsize=14)
plt.legend(loc="upper left", fontsize=13)
plt.tight_layout()

data1.drop('ch 1',
           axis='columns', inplace=True)
data1.drop('ch 2',
           axis='columns', inplace=True)

##### USTALENIE KIEDY DOTARŁ PLOMIEN I FALA DO CZUJNIKOW #####
#####

for i in data1:
    if i != "time [us]" and l < 6:
        k=-1
        for j in data1[i]:
            k+=1
            if data1[i][k] > tr_SN:
                list3.append(data1["time [us]"][k]/1000)

```

```

        break
elif i != "time [us]":
    k=-1
    for j in data1[i]:
        k+=1
        if data1[i][k] > tr_SJ:
            list4.append(data1["time [us]"][k]/1000)
            break
    l+=1

```

```

list4[1]=list4[2]*list2[1]/list2[2]
df1["TOA_P [ms]"]=list3
df1["TOA_V [ms]"]=list4

```

```
##### WYKRES TOA #####
```

```

fig2 = plt.figure("TOA" + str(numer), figsize=(16, 9), dpi=150)
plt.clf()

```

```
fig2.suptitle('ToA\n' + opis, fontsize=20)
```

```

plt.style.use('seaborn-deep')
plt.xlabel("Dystans [m]", fontsize=15)
plt.ylabel("Czas [ms]", fontsize=15)
plt.grid(color="#717171", linestyle='--', linewidth=0.3)
plt.xlim(0,3)
plt.tick_params(axis='both', labelsize=14)

```

```

plt.plot([0,df1["Odlegosc"][0]],[0,df1["TOA_P [ms]"][0]], linestyle='--', color="g")
plt.plot([0,df1["Odlegosc"][2]],[0,df1["TOA_V [ms]"][2]], linestyle='--', color="b")

```

```

plt.plot(df1["Odlegosc"],df1["TOA_P [ms]"], color="g", label="Fala cisnieniowa", marker="o")
plt.plot(df1["Odlegosc"][2:],df1["TOA_V [ms]"][2:], color="b", label="Front plomienia", marker="o")
plt.legend(fontsize=15, loc="upper left")
plt.tight_layout()

```

```
##### SREDNIA ODLEGLOSC POMIEDZY CZUJNIKAMI #####
```

```

list5=[0]
l=1
for i in df1["Odlegosc"]:
    if l<8:
        list5.append((df1["Odlegosc"][l]+df1["Odlegosc"][l-1])/2)
    l+=1
df1["Srednia odlegosc"]=list5

```

```
##### PREDKOSC FALI CISNIENIOWEJ #####
```

```

list6=[0]
l=1
print("\nEksperyment: "+numer)

```

```

for i in df1["TOA_P [ms]"]:
    if l<8:
        if (df1["Odlegosc"][[l]-df1["Odlegosc"][[l-1]]/(df1["TOA_P [ms]"][[l]-df1["TOA_P [ms]"][[l-1]]]>100:
            list6.append(0)
        else:
            list6.append((df1["Odlegosc"][[l]-df1["Odlegosc"][[l-1]]*1000/(df1["TOA_P [ms]"][[l]-df1["TOA_P [ms]"]
                ][[l-1]]))
            print("Odlegosc "+str(l+1)+" i", str(l)," :", df1["Odlegosc"][[l]],",", df1["Odlegosc"][[l-1], ";TOAP1-2:",
                df1["TOA_P [ms]"][[l]],",",df1["TOA_P [ms]"][[l-1], ", droga: ", round((df1["Odlegosc"][[l]-df1["Odleg
                losc"][[l-1]]), 3))
            l+=1
    df1["Predkosc P"]=list6

```

```

#####
# PREDKOSC PLOMIENIA #####
list7=[0]
l=1
for i in df1["TOA_V [ms]"]:
    if l<8:
        if (df1["Odlegosc"][[l]-df1["Odlegosc"][[l-1]]/(df1["TOA_V [ms]"][[l]-df1["TOA_V [ms]"][[l-1]]]>100:
            list7.append(0)
        else:
            list7.append((df1["Odlegosc"][[l]-df1["Odlegosc"][[l-1]]*1000/(df1["TOA_V [ms]"][[l]-df1["TOA_V [ms]
                ][[l-1]]))
            print("Odlegosc "+str(l+1)+" i", str(l)," :",df1["Odlegosc"][[l]],",",df1["Odlegosc"][[l-1], ",TOAV1-2:",
                df1["TOA_V [ms]"][[l]],",",df1["TOA_V [ms]"][[l-1]])
            l+=1
    df1["Predkosc V"]=list7

```

```

j=-1
for p,v in zip(list6,list7):
    j+=1
    if j < 7 and (abs(p) > V_max or (list6[j-1]>0 and list6[j+1]>0 and p < 0)
        or (p > 2*(list6[j-1]+list6[j+1])/2 and list6[j-1]>0 and list6[j+1] > 0)
        or (p > 2*(abs(list6[j-1])+abs(list6[j+1]))/2 ):

        if (list6[j-1]<0 and list6[j+1]<0 and p < 0): list6[j] = ((list6[j-1])+(list6[j+1]))/2
        else: list6[j] = (abs(list6[j-1])+abs(list6[j+1]))/2
    elif j < 7 and (abs(v) > V_max or (list7[j-1]>0 and list7[j+1]>0 and v < 0)
        or (v > 2*(list7[j-1]+list7[j+1])/2 and list7[j-1]>0 and list7[j+1] > 0)
        or (v > 2*(abs(list7[j-1])+abs(list7[j+1]))/2 ):

        if (list7[j-1]<0 and list7[j+1]<0 and v < 0): list7[j] = ((list7[j-1])+(list7[j+1]))/2
        else: list7[j] = (abs(list7[j-1])+abs(list7[j+1]))/2

    list6[j]=abs(list6[j])
    list7[j]=abs(list7[j])

```

```
#####

```

```

fig3 = plt.figure("V" + numer, figsize=(16, 9), dpi=150)
plt.clf()

```

```
fig3.suptitle('dx/dt\n' + opis, fontsize=20)
```

```
plt.style.use('seaborn-deep')
plt.xlabel("Dystans [m]", fontsize=15)
plt.ylabel("Predkosc [m/s]", fontsize=15)
plt.grid(color='#717171', linestyle='--', linewidth=0.3)

plt.plot([0,list5[1]],[0,df1["Predkosc P"][[1]], linestyle='--', color="g")
plt.plot([0,list5[3]],[0,list7[3]], linestyle='--', color="b")

plt.plot([list5[1],list5[2]],[df1["Predkosc P"][[1],list6[2]], color="g",marker="o")
plt.plot(list5[2:],list6[2:], label="Fala cisnieniowa", color="g",marker="o")
plt.plot(list5[3:],list7[3:], label="Front plomienia", color="b",marker="o")
plt.ylim(0,V_CJ+200)
plt.tick_params(axis='both', labelsize=14)
```

```
V_CJ_t = str(V_CJ)
aP_t = str(aP)
plt.plot([0,3.5], [V_CJ,V_CJ], linestyle='-.', color = "r", linewidth=1.5, alpha=0.6)
plt.plot([0,3.5], [aP,aP], linestyle='-.', color = "r", linewidth=1.5, alpha=0.6)
plt.xlim(0,3)
plt.text(0.1, V_CJ+30, r'$V_{CJ}=$'+V_CJ_t+'[m/s]', fontsize=15)
plt.text(0.1, aP+30, r'$a_p=$'+aP_t+'[m/s]', fontsize=15)
```

```
plt.legend(fontsize=15, loc="upper right")
plt.tight_layout()
```

```
##### CIAG DALSZY WYKRESU ZBIORCZEGO #####
```

```
df_temp = df1
df_temp=df_temp.drop(df_temp.index[2])

print("DF TEMP ", df_temp['Odleglosc'])
```

```
##### Linia pochyla reprezentujaca predkosc pierwszej fali #####
zbiorczy.plot(df_temp["TOA_P [ms]"]*1000, df_temp["Odleglosc"]+0.08,
              linewidth=2, color='k')
```

```
##### USUWANIE kanału zanieczyszczonego i urwanego #####
```

```
data.drop('ch 3',
          axis='columns', inplace=True)
```

```
##### USTALENIE KIEDY DOTARLA FALA DO CZUJNIKOW #####
```

```

l=-1
list_zbior = []
list_czas = []

##### CZAS DOTARCIA POWROTNEJ FALI #####
for i, o in zip(data,df_temp["Odleglosc"]):
    if i != "time [us]" and l < 6:
        k=czas_zbior
        print("Kanal ",i)
        for j in data[i]:
            k+=1
            if data[i][k] > tr_SN_f2:
                list_czas.append(data["time [us]"][k])
                if data[i][k]> 1.2: list_zbior.append(o+0.3)
                else: list_zbior.append(data[i][k-100]+o-0.3)
                break
    l+=1

list_czas.append(df1["TOA_P [ms]"][7]*1000)
list_zbior.append(df_temp["Odleglosc"][7]+0.08)
list_czas = list_czas[:7]

list_czas = list_czas[::-1]
list_zbior = list_zbior[::-1]

print("List zbior", list_zbior)
print("List czas", list_czas)

##### Linia pochyla reprezentujaca fale powrotna #####
war_y = df_temp["Odleglosc"][:-1]+0.08

zbiorczy.plot(list_czas, war_y,
              linewidth=2, color='k')

##### OPOZNIONY ZAPLON #####
predkosc_powrotn = (1000000*(df_temp["Odleglosc"][7]-df_temp["Odleglosc"][6]))/(list_czas[1]-list_czas[0])

opoz_zapl = (df1['TOA_V [ms]'][7]-df1['TOA_P [ms]'][7])*1000
print("\nOPOZNIENIE ZAPLONU:",opoz_zapl,"[us]\n")
print("OSTATNIA PREDKOSC:", round(list6[7],1),"[m/s]\n")
print("PREDKOSC POWROTNIA", round(predkosc_powrotn,1), "[m/s]\n")

# for i in data1:

return (df1, opoz_zapl)

#####

```

#####

##### WYSWIETLENIE WYKRESOW #####  
#####

##### Funkcja(dane z czujnikow, opis, numer exp, trigger dla SN, trigger dla SN powrotna fala,  
##### trigger dla SJ, trig dla 2 pierwszych SN, czas po ktorym mierzymy trigger powrotnej fali, max pred dopusz  
cz m/s)

##### TESTY\_H2-pow\_fi1\_091121 #####

```
# df1=funkcja(data1,text1,"1",0.25,0.9,0.08,0.15,6200,1750,1979.24,1009.8, 8000)
# df2=funkcja(data2,text2,"2",0.25,1.1,0.225,0.25,6200,1750,1979.24,1009.8,8000)
# ###funkcja(data3,text3,"3",0.15,0.6)
# df4=funkcja(data4,text4,"4",0.25,0.31,0.11,0.15,7500,1750,1979.24,1009.8, 11000)
# df5=funkcja(data5,text5,"5",0.25,0.28,0.12,0.15,7500,1750,1979.24,1009.8, 11000)
# df6=funkcja(data6,text6,"6",0.25,0.35,0.049,0.231,7500,1750,1979.24,1009.8,11000)
```

##### testy\_H2-pow\_fi1\_061221 #####

```
# df7=funkcja(data7,text7,"7",0.35,0.8,0.05,0.231,6700,1750,1979.24,1009.8, 8100)
# df8=funkcja(data8,text8,"8",0.17,0.8,0.2,0.2,6500,1750,1979.24,1009.8, 8200)
```

##### testy\_H2-pow\_fi08\_061221 #####

```
# df9=funkcja(data9,text9,"9",0.22,0.25,0.05,0.14,9000,1300,1870.7,946.5, 14000)
# df10=funkcja(data10,text10,"10",0.17,0.35,0.044,0.2,9800,1100,1870.7,946.5, 13200)
```

##### testy\_H2-pow\_fi08\_071221 #####

```
# df11=funkcja(data11,text11,"11",0.203,0.95,0.3,1.2,7250,2000,1870.7,946.5, 9000)
# df12=funkcja(data12,text12,"12",0.29,0.35,0.044,0.2,10130,1111,1870.7,946.5, 13000)
```

##### testy\_H2-pow\_fi1\_13122021 #####

```
# df13=funkcja(data13,text13,"13",0.203,0.65,0.07,0.2,6750,2000,1979.24,1009.8, 8000)
# df14=funkcja(data14,text14,"14",0.29,0.4,0.1,0.2,7500,2000,1979.24,1009.8, 10000)
# df15=funkcja(data15,text15,"15",0.29,0.4,0.08,0.2,7500,2000,1979.24,1009.8, 10000)
```

##### testy\_H2-pow\_fi16\_13122021 #####

```
# df16=funkcja(data16,text16,"16",0.3,1,0.07,0.3,3770,1700,2102.29,1056.6, 5500)
# df17=funkcja(data17,text17,"17",0.25,0.25,0.15,0.1135,6600,2200,2102.29,1056.6, 10500)
# df18=funkcja(data18,text18,"18",0.137,0.4,0.08,0.3,6500,2200,2102.29,1056.6, 9200)
# df19=funkcja(data19,text19,"19",0.2,0.4,0.07,0.3,6660,2200,2102.29,1056.6, 9000)
```

##### TESTY-H2-pow\_fi08\_101121 #####

```
# df20=funkcja(data20,text20,"20",0.24,0.185,0.07,0.1,9600,1100,1870.7,946.5, 13500)
```

##### WCZYTANIE DANYCH O CZUJNIKACH #####  
#####

```

xxx = pd.read_csv("https://raw.githubusercontent.com/RusieckiFilip/PracaInz/main/VMPA.csv", sep = ";")

for i in xxx["SN"]:
    if type(i)==int:
        i = str(i)

##### FUNKCJA WCZYTANIA DANYCH #####
#####

def wczytanie_danych(nazwa_pliku, nazwa_folderu, kanal=0):
    data = pd.read_csv("https://raw.githubusercontent.com/RusieckiFilip/PracaInz/main/" +
                        nazwa_folderu+"/H2-pow_fi1/"+nazwa_pliku, sep = ";")

    #### USUWANIE SZUMU #####
    if kanal != 0:
        i=0
        for j in data[kanal]:
            if data[kanal][i] > 0.45:
                data[kanal] = data[kanal].drop(labels=list(range(i,31999)), axis=0)
                break
            i+=1
    for i in data:
        j=0
        for k in data[i]:
            if i != "time [us]" and j < 2000:
                data[i][j]=0
            else: break
            j+=1
    return data

##### WCZYTANIE DANYCH #####
#####

# data1 = wczytanie_danych("Exp_01.csv","testy_H2-pow_fi1_new_setup")
# text1 = wczytanie_danych("Exp_01_t.csv","testy_H2-pow_fi1_new_setup")

# data2 = wczytanie_danych("Exp_02.csv","testy_H2-pow_fi1_new_setup")
# text2 = wczytanie_danych("Exp_02_t.csv","testy_H2-pow_fi1_new_setup")

# data3 = wczytanie_danych("Exp_03.csv","testy_H2-pow_fi1_new_setup")
# text3 = wczytanie_danych("Exp_03_t.csv","testy_H2-pow_fi1_new_setup")

# data4 = wczytanie_danych("Exp_04.csv","testy_H2-pow_fi1_new_setup")
# text4 = wczytanie_danych("Exp_04_t.csv","testy_H2-pow_fi1_new_setup")

# data5 = wczytanie_danych("Exp_05.csv","testy_H2-pow_fi1_new_setup")
# text5 = wczytanie_danych("Exp_05_t.csv","testy_H2-pow_fi1_new_setup")

# data6 = wczytanie_danych("Exp_01.csv","testy_H2-pow_fi16_new_setup_16152021")
# text6 = wczytanie_danych("Exp_01_t.csv","testy_H2-pow_fi16_new_setup_16152021")

```

```

# data7 = wczytanie_danych("Exp_02.csv","testy_H2-pow_fi16_new_setup_16152021")
# text7 = wczytanie_danych("Exp_02_t.csv","testy_H2-pow_fi16_new_setup_16152021")

# data8 = wczytanie_danych("Exp_03.csv","testy_H2-pow_fi16_new_setup_16152021")
# text8 = wczytanie_danych("Exp_03_t.csv","testy_H2-pow_fi16_new_setup_16152021")

# data9 = wczytanie_danych("Exp_04.csv","testy_H2-pow_fi16_new_setup_16152021")
# text9 = wczytanie_danych("Exp_04_t.csv","testy_H2-pow_fi16_new_setup_16152021")

# data10 = wczytanie_danych("Exp_05.csv","testy_H2-pow_fi16_new_setup_16152021")
# text10 = wczytanie_danych("Exp_05_t.csv","testy_H2-pow_fi16_new_setup_16152021")

# data11 = wczytanie_danych("Exp_06.csv","testy_H2-pow_fi16_new_setup_16152021")
# text11 = wczytanie_danych("Exp_06_t.csv","testy_H2-pow_fi16_new_setup_16152021")

# data12 = wczytanie_danych("Exp_07.csv","fi16_styczen_newsetup")
# text12 = wczytanie_danych("Exp_07_t.csv","fi16_styczen_newsetup")

# data13 = wczytanie_danych("Exp_08.csv","fi16_styczen_newsetup")
# text13 = wczytanie_danych("Exp_08_t.csv","fi16_styczen_newsetup")

# data14 = wczytanie_danych("Exp_09.csv","fi16_styczen_newsetup")
# text14 = wczytanie_danych("Exp_09_t.csv","fi16_styczen_newsetup")

# data15 = wczytanie_danych("Exp_010.csv","fi16_styczen_newsetup")
# text15 = wczytanie_danych("Exp_010_t.csv","fi16_styczen_newsetup")

# data16 = wczytanie_danych("Exp_011.csv","fi16_styczen_newsetup")
# text16 = wczytanie_danych("Exp_011_t.csv","fi16_styczen_newsetup")

# data17 = wczytanie_danych("Exp_012.csv","fi16_styczen_newsetup")
# text17 = wczytanie_danych("Exp_012_t.csv","fi16_styczen_newsetup")

# data18 = wczytanie_danych("Exp_01.csv","testy_H2-pow_fi128_new_setup_11012022")
# text18 = wczytanie_danych("Exp_01_t.csv","testy_H2-pow_fi128_new_setup_11012022")

# data19 = wczytanie_danych("Exp_02.csv","testy_H2-pow_fi128_new_setup_11012022")
# text19 = wczytanie_danych("Exp_02_t.csv","testy_H2-pow_fi128_new_setup_11012022")

# data20 = wczytanie_danych("Exp_03.csv","testy_H2-pow_fi128_new_setup_11012022")
# text20 = wczytanie_danych("Exp_03_t.csv","testy_H2-pow_fi128_new_setup_11012022")

# data21 = wczytanie_danych("Exp_04.csv","testy_H2-pow_fi128_new_setup_11012022")
# text21 = wczytanie_danych("Exp_04_t.csv","testy_H2-pow_fi128_new_setup_11012022")

# data22 = wczytanie_danych("Exp_05.csv","testy_H2-pow_fi128_new_setup_11012022")
# text22 = wczytanie_danych("Exp_05_t.csv","testy_H2-pow_fi128_new_setup_11012022")

# data23 = wczytanie_danych("Exp_06.csv","testy_H2-pow_fi128_new_setup_11012022")
# text23 = wczytanie_danych("Exp_06_t.csv","testy_H2-pow_fi128_new_setup_11012022")

```

```

def funkcja(data1,text1,numer,tr_SN, tr_SN_f2, tr_SJ, tr_SN2, czas_zbior, V_max, V_CJ, aP, t_d, usrednianie = "nie"):

```

```
##### TWORZENIE KOPII #####
data = data1[:]
```

```
list1=[]
for i in text1["Tabela"]:
    l=0
    for j in xxx["SN"]:
        if j in i:
            print("Czujnik: ", j)
            list1.append(xxx["VMPA"][l])
    l+=1
```

```
##### Pobieranie współrzędnych i opisów #####
pattern = "]\(.*)\["
list2=[]
print("\n")
l=0
```

```
# Zczytanie pozycji z czujnika
for i in text1["Tabela"]:
    if i != "time [us]":
        if "POS" in i:
            substring = re.search(pattern, i).group(1)
            list2.append(float(substring))
```

```
# Zczytanie opisu eksperymentu
```

```
for i in text1["Tabela"]:
    if i != "time [us]":
        if "[EXP_DESC_s]" in i:
            opis = i
            break
```

```
for i in text1["Tabela"]:
    if i != "time [us]":
        if "/EXP_DESC_s" in i:
            opis = opis + " " + i
            break
    opis = re.search(pattern, opis).group(1)
```

```
##### TWORZENIE DATAFRAME Z DANYMI CZUJNIKOW #####
#####
```

```
d = {'Kanal': range(1,6), 'VPMA': list1, "Odleglosc": list2[:5]}
df1 = pd.DataFrame(data=d)
```

```
l=-1
```

```
##### PRZELICZENIE NA MPa CZUJNIKOW #####
for i in data1:
    if i != "time [us]" and l < 5:
        data1[i] = data1[i]/df1["VPMA"][l]+0.1
    l+=1
#####
```

```
##### WYKRES ODCZYTÓW CZUJNIKÓW #####
#
```

```
fig1 = plt.figure("data" + numer, figsize=(16, 9), dpi=150)
plt.clf()

fig1.suptitle(opis, fontsize=20)

ax1=plt.subplot(211)
plt.style.use('seaborn-deep')
plt.xlabel("Czas [us]", fontsize=15)
plt.ylabel("P [MPa]", fontsize=15)
plt.grid(color='#717171', linestyle='--', linewidth=0.3)
#
plt.xlim(2000,t_d)
#color = cm.rainbow(np.linspace(0, 1, 8))
for i in range(1,6):
    plt.plot(data1["time [us]"],data1["ch "+ str(i)], linewidth=1.5, label = "ch"+ str(i) + " SN")
plt.legend(loc="upper left")
plt.tick_params(axis='both', labelsize=14)

ax1=plt.subplot(212)
plt.style.use('seaborn-deep')
plt.xlabel("Czas [us]", fontsize=15)
plt.ylabel("U [V]", fontsize=15)
plt.grid(color='#717171', linestyle='--', linewidth=0.3)
plt.ylim(0,1)
plt.xlim(2000,t_d)
for i in range(1,11):
    if i > 5:
        plt.plot(data1["time [us]"],data1["ch "+ str(i)], linewidth=1.5, label = "ch"+ str(i) + " SJ" )
plt.legend(loc="upper left")
plt.tick_params(axis='both', labelsize=14)

plt.tight_layout()
```

```
##### WYKRES ZBIORCZY #####

```

```
fig4 = plt.figure("Zbiorczy" + numer, figsize=(16, 9), dpi=150)
plt.clf()

fig4.suptitle(opis, fontsize=20)
zbiorczy = plt.subplot(111)

plt.style.use('seaborn-deep')
plt.xlabel("Czas [us]", fontsize=15)
plt.ylabel("P[MPa] + x[m]", fontsize=15)
plt.grid(color='#717171', linestyle='--', linewidth=0.3)
#plt.ylim(0,2.5)
```

```

plt.xlim(2000,t_d)
color = cm.rainbow(np.linspace(0, 1, 5))
for i, c in zip(range(1,6),color):
    plt.plot(data1["time [us]"],data1["ch "+ str(i)] + df1["Odlegosc"][i-1],
              linewidth=1, label = "ch"+ str(i) + " SN, " + str(df1["Odlegosc"][i-1])+" m", c=c)
plt.legend(loc="upper left", fontsize=13)
plt.tick_params(axis='both', labelsize=14)
plt.tight_layout()

#####
##### USTALENIE KIEDY DOTARŁ PLOMIEN I FALA DO CZUJNIKOW #####
#####

list3=[]
list4=[]
l=-1

for i in data1:
    if i != "time [us]" and l <= 5 and i != "ch 6":
        k=-1
        for j in data1[i]:
            k+=1
            if data1[i][k] > tr_SN:
                list3.append(data1["time [us]"][k]/1000)
                break
    elif i != "time [us]":
        k=-1
        for j in data1[i]:
            k+=1
            if data1[i][k] > tr_SJ:
                list4.append(data1["time [us]"][k]/1000)
                break
        l+=1
print("List 3:", list3)
print("List 4:", list4)
df1["TOA_P [ms]"] = list3
df1["TOA_V [ms]"] = list4

#####
##### WYKRES TOA #####
#####

fig2 = plt.figure("TOA" + str(numer), figsize=(16, 9), dpi=150)
plt.clf()

fig2.suptitle('ToA\n' + opis, fontsize=17)

plt.style.use('seaborn-deep')
plt.xlabel("Dystans [m]", fontsize=15)
plt.ylabel("Czas [ms]", fontsize=15)
plt.grid(color="#717171", linestyle='--', linewidth=0.3)
plt.xlim(0,2)

plt.plot([0,df1["Odlegosc"][0]],[0,df1["TOA_P [ms]"][0]], linestyle='--', color="g")
plt.plot([0,df1["Odlegosc"][0]],[0,df1["TOA_V [ms]"][0]], linestyle='--', color="b")

```

```

plt.plot(df1["Odlegosc"],df1["TOA_P [ms]"], color="g", label="Fala cisnieniowa",marker="o")
plt.plot(df1["Odlegosc"],df1["TOA_V [ms]"], color="b", label="Front plomienia",marker="o")
plt.legend(loc="upper left", fontsize=15)
plt.tick_params(axis='both', labelsize=14)
plt.tight_layout()

```

##### SREDNIA ODLEGLOSC POMIEDZY CZUJNIKAMI #####

```

list5=[0]
l=1
for i in df1["Odlegosc"]:
    if l<5:
        list5.append((df1["Odlegosc"][l]+df1["Odlegosc"][l-1])/2)
    l+=1
df1["Srednia odlegosc"]=list5

```

##### PREDKOSC FALI CISNIENIOWEJ #####

```

list6=[0]
l=1
print("Eksperyment: "+numer)
for i in df1["TOA_P [ms]"]:
    if l<5:
        if (df1["Odlegosc"][l]-df1["Odlegosc"][l-1])/(df1["TOA_P [ms]"][l]-df1["TOA_P [ms]"][l-1])>100:
            list6.append(0)
        else:
            list6.append((df1["Odlegosc"][l]-df1["Odlegosc"][l-1])*1000/(df1["TOA_P [ms]"][l]-df1["TOA_P [ms]"][l-1]))
            print("Odlegosc "+str(l+1)+" i", str(l),":", df1["Odlegosc"][l],",", df1["Odlegosc"][l-1], ";TOAP1-2:", round(abs(df1["TOA_P [ms]"][l]-df1["TOA_P [ms]"][l-1]),3), ", droga: ", round((df1["Odlegosc"][l]-df1["Odlegosc"][l-1]), 3))
    l+=1
df1["Predkosc P"]=list6

```

##### PREDKOSC PLOMIENIA #####

```

list7=[0]
l=1
for i in df1["TOA_V [ms]"]:
    if l<5:
        if (df1["Odlegosc"][l]-df1["Odlegosc"][l-1])/(df1["TOA_V [ms]"][l]-df1["TOA_V [ms]"][l-1])>100:
            list7.append(0)
        else:
            list7.append((df1["Odlegosc"][l]-df1["Odlegosc"][l-1])*1000/(df1["TOA_V [ms]"][l]-df1["TOA_V [ms]"][l-1]))
            print("Odlegosc "+str(l+1)+" i", str(l),":", df1["Odlegosc"][l],",", df1["Odlegosc"][l-1], ";TOAV1-2:", round(abs(df1["TOA_V [ms]"][l]-df1["TOA_V [ms]"][l-1]),3), ", droga: ", round((df1["Odlegosc"][l]-df1["Odlegosc"][l-1]), 3))
    l+=1
df1["Predkosc V"]=list7

```

```

if usrednianie == "tak":
    j=-1
    for p,v in zip(list6,list7):
        j+=1
        if abs(p) > 2400:
            list6[j]=1000
        if abs(v) > 2400:
            list7[j]=1000
        if j < 4 and (abs(p) > V_max or (list6[j-1]>0 and list6[j+1]>0 and p < 0)
                      or (p > 2*(list6[j-1]+list6[j+1])/2 and list6[j-1]>0 and list6[j+1] > 0)
                      or (p > 2*(abs(list6[j-1])+abs(list6[j+1]))/2 )):

            if (list6[j-1]<0 and list6[j+1]<0 and p < 0): list6[j] = ((list6[j-1])+(list6[j+1]))/2
            else: list6[j] = (abs(list6[j-1])+abs(list6[j+1]))/2
        elif j < 4 and (abs(v) > V_max or (list7[j-1]>0 and list7[j+1]>0 and v < 0)
                      or (v > 2*(list7[j-1]+list7[j+1])/2 and list7[j-1]>0 and list7[j+1] > 0)
                      or (v > 2*(abs(list7[j-1])+abs(list7[j+1]))/2 )):

            if (list7[j-1]<0 and list7[j+1]<0 and v < 0): list7[j] = ((list7[j-1])+(list7[j+1]))/2
            else: list7[j] = (abs(list7[j-1])+abs(list7[j+1]))/2

        else:
            list6[j]=abs(list6[j])
            list7[j]=abs(list7[j])

    j=-1
    for p,v in zip(list6,list7):
        j+=1
        if abs(p) > 2400:
            list6[j]=1000
        if abs(v) > 2400:
            list7[j]=1000
        if j < 4 and (abs(p) > V_max or (list6[j-1]>0 and list6[j+1]>0 and p < 0)
                      or (p > 2*(list6[j-1]+list6[j+1])/2 and list6[j-1]>0 and list6[j+1] > 0)
                      or (p > 2*(abs(list6[j-1])+abs(list6[j+1]))/2 )):

            if (list6[j-1]<0 and list6[j+1]<0 and p < 0): list6[j] = ((list6[j-1])+(list6[j+1]))/2
            else: list6[j] = (abs(list6[j-1])+abs(list6[j+1]))/2
        elif j < 4 and (abs(v) > V_max or (list7[j-1]>0 and list7[j+1]>0 and v < 0)
                      or (v > 2*(list7[j-1]+list7[j+1])/2 and list7[j-1]>0 and list7[j+1] > 0)
                      or (v > 2*(abs(list7[j-1])+abs(list7[j+1]))/2 )):

            if (list7[j-1]<0 and list7[j+1]<0 and v < 0): list7[j] = ((list7[j-1])+(list7[j+1]))/2
            else: list7[j] = (abs(list7[j-1])+abs(list7[j+1]))/2

        #####
        list6[j]=abs(list6[j])
        list7[j]=abs(list7[j])
        #####
list7 = [abs(i) for i in list7]

fig3 = plt.figure("V" + numer, figsize=(16, 9), dpi=150)

```

```

plt.clf()

fig3.suptitle('dx/dt\n' + opis, fontsize=17)

plt.style.use('seaborn-deep')
plt.xlabel("Dystans [m]", fontsize=15)
plt.ylabel("Predkosc [m/s]", fontsize=15)
plt.grid(color='#717171', linestyle='--', linewidth=0.3)

plt.plot([0,list5[1]],[0,df1["Predkosc P"][1]], linestyle='--', color="g")
plt.plot([0,list5[3]],[0,list7[3]], linestyle='--', color="b")

plt.plot([list5[1],list5[2]],[df1["Predkosc P"][1],list6[2]], color="g", marker="o")
plt.plot(list5[2:],list6[2:], label="Fala cisnieniowa", color="g", marker="o")
plt.plot(list5[3:],list7[3:], label="Front plomienia", color="b", marker="o")
plt.ylim(0,V_CJ+200)
plt.tick_params(axis='both', labelsize=14)

V_CJ_t = str(V_CJ)
aP_t = str(aP)
plt.plot([0,3.5], [V_CJ,V_CJ], linestyle='-.', color = "r", linewidth=1.5, alpha=0.6)
plt.plot([0,3.5], [aP,aP], linestyle='-.', color = "r", linewidth=1.5, alpha=0.6)
plt.xlim(0,2)
plt.text(0.1, V_CJ+30, r'$V_{CJ}=$\''+V_CJ_t+'[m/s]', fontsize=15)
plt.text(0.1, aP+30, r'$a_P=$\''+aP_t+'[m/s]', fontsize=15)

plt.legend(loc="upper right", fontsize=15)
plt.tight_layout()

```

##### CIAG DALSZY WYKRESU ZBIORCZEGO #####

```

df_temp = df1

df_temp=df_temp.drop(df_temp.index[2])

print("DF TEMP ", df_temp['Odleglosc'])

##### Linia pochyla reprezentujaca predkosc pierwszej fali #####
zbiorczy.plot(df_temp["TOA_P [ms]"]*1000, df_temp["Odleglosc"]+0.08,
              linewidth=2, color='k')

data.drop('ch 3',
          axis='columns', inplace=True)

##### USTALENIE KIEDY DOTARLA FALA DO CZUJNIKOW #####
l=-1
list_zbior = []

```

```

list_czas = []

##### CZAS DOTARCIA POWROTNEJ FALI #####
for i, o in zip(data, df_temp["Odlegosc"]):
    if i != "time [us]" and i < 6:
        k=czas_zbior
        print("Kanal ",i)
        for j in data[i]:
            k+=1
            if data[i][k] > tr_SN_f2:
                list_czas.append(data["time [us]"][k])
                if data[i][k]> 1.2: list_zbior.append(o+0.3)
                else: list_zbior.append(data[i][k-100]+o-0.3)
                break
        i+=1

list_czas.append(df1["TOA_P [ms]"][4]*1000)
list_zbior.append(df_temp["Odlegosc"][4]+0.08)
list_czas = list_czas[:4]

list_czas = list_czas[::-1]

#####
##### Wartosci cisnien ToA powrotnej fali #####
j=0
for i in df_temp["Odlegosc"]:
    if j < 7: list_zbior.append(i+tr_SN_f2)
    j+=1

#####
list_zbior = list_zbior[::-1]

print("List zbior", list_zbior)
print("List czas", list_czas)

##### Linia pochyla reprezentujaca fale powrotna #####
zbiorczy.plot(list_czas, df_temp["Odlegosc"][:-1]+0.08,
              linewidth=2, color='k')

##### OPOZNIONY ZAPLON #####
predkosc_powrotn = (1000000*(df_temp["Odlegosc"][4]-df_temp["Odlegosc"][3]))/(list_czas[1]-list_czas[0])

opoz_zapl = (df1['TOA_V [ms]'][4]-df1['TOA_P [ms]'][4])*1000
print("\nOPOZNIENIE ZAPLONU:",opoz_zapl,"[us]\n")
print("OSTATNIA PREDKOSC:", round(list6[4],1),"[m/s]\n")
print("PREDKOSC POWROTNIA", round(predkosc_powrotn,1), "[m/s]\n")

return df1

```

```
#####
#####
```

```
##### WYSWIETLENIE WYKRESOW #####
#####
```

```
##### Funkcja(dane z czujnikow, opis, numer exp, trigger dla SN, trigger dla SN powrotna fala,
##### trigger dla SJ, trig dla 2 pierwszych SN, czas po ktorym mierzymy trigger powrotnej fali,
##### max dopusz predkosc fizyczna, V_CJ,aP, czas data, usrednianie predkosci)
```

```
##### TESTY_H2-pow_fi1_091121 #####
```

```
##### CZAS = LICZBA / 2 bo kazda proba byla liczona co 0.5 us
```

```
# df1=funkcja(data1,text1,"1",0.25,0.35,0.13,0.15,9000,1750,1979.24,1009.8,8000,"tak")
# df2=funkcja(data2,text2,"2",0.25,1.1,0.225,0.25,9000,1750,1979.24,1009.8,5500)
# df3=funkcja(data3,text3,"3",0.25,1.1,0.225,0.25,8000,1750,1979.24,1009.8,6500,"tak")
# ##df4=funkcja(data4,text4,"4",0.19,0.4,0.158,0.19,10000,1750,1979.24,1130.1,1000)
# df5=funkcja(data5,text5,"5",0.25,0.5,0.156,0.15,10000,1750,1979.24,1009.8,7600)
```

```
# ##### TESTY_H2-pow_fi16_newsetup
```

```
# df6=funkcja(data6,text6,"6",0.25,0.3,0.13,0.15,5000,1750,2102.29,1056.6,7500)
# df7=funkcja(data7,text7,"7",0.25,0.33,0.225,0.25,11000,1750,2102.29,1056.6,7500,"tak")
# df8=funkcja(data8,text8,"8",0.25,0.4,0.225,0.25,11000,1750,2102.29,1056.6,6800,"tak")
# df9=funkcja(data9,text9,"9",0.19,0.4,0.158,0.19,10000,1750,2102.29,1056.6,7000,"tak")
# df10=funkcja(data10,text10,"10",0.25,0.4,0.156,0.15,10000,1750,2102.29,1056.6,6600,"tak")
# df11=funkcja(data11,text11,"11",0.25,0.35,0.156,0.15,10000,1750,2102.29,1056.6,7000)
```

```
# # # ##### fi16_styczen_newsetup (40%) #####
```

```
# df12=funkcja(data12,text12,"12",0.25,0.35,0.156,0.15,10000,1750,2102.29,1056.6,7000,"tak")
# df13=funkcja(data13,text13,"13",0.25,0.35,0.156,0.15,10000,1750,2102.29,1056.6,7000)
# df14=funkcja(data14,text14,"14",0.25,0.35,0.156,0.15,10000,1750,2102.29,1056.6,7300)
# df15=funkcja(data15,text15,"15",0.25,0.35,0.156,0.15,10000,1750,2102.29,1056.6,6900,"tak")
# df16=funkcja(data16,text16,"16",0.25,0.32,0.156,0.15,10000,1750,2102.29,1056.6,7200,"tak")
# df17=funkcja(data17,text17,"17",0.25,0.35,0.156,0.15,10000,1750,2102.29,1056.6,6700)
```

```
##### testy_H2-pow_fi128_new_setup_11012022 #####
```

```
# df18=funkcja(data18,text18,"18",0.25,0.5,0.156,0.15,10000,1750,2056.51,1039.5,6000)
# df19=funkcja(data19,text19,"19",0.25,0.35,0.156,0.15,10000,1750,2056.51,1039.5,7000)
# df20=funkcja(data20,text20,"20",0.25,0.35,0.156,0.15,10000,1750,2056.51,1039.5,7000)
# df21=funkcja(data21,text21,"21",0.25,0.5,0.156,0.15,10000,1750,2056.51,1039.5,6000,"tak")
# df22=funkcja(data22,text22,"22",0.25,0.8,0.156,0.15,8000,1750,2056.51,1039.5,5300,"tak")
# df23=funkcja(data23,text23,"23",0.25,0.5,0.156,0.15,10000,1750,2056.51,1039.5,5800,"tak")
```

```
##### WCZYTANIE DANYCH O CZUJNIKACH #####
#####
```

```
xxx = pd.read_csv("https://raw.githubusercontent.com/RusieckiFilip/PracaInz/main/VMPA.csv", sep = ";")
```

```

for i in xxx["SN"]:
    if type(i)==int:
        i = str(i)

##### FUNKCJA WCZYTANIA DANYCH #####
#####

def wczytanie_danych(nazwa_pliku, nazwa_folderu, kanal=0):
    data = pd.read_csv("https://raw.githubusercontent.com/RusieckiFilip/PracaInz/main/" +
                        nazwa_folderu+"/H2-pow_fi1/"+nazwa_pliku, sep = "\t")

##### USUWANIE SZUMU #####
if kanal != 0:
    i=0
    for j in data[kanal]:
        if data[kanal][i] > 0.45:
            data[kanal] = data[kanal].drop(labels=list(range(i,15998)), axis=0)
            break
        i+=1
    for i in data:
        j=0
        for k in data[i]:
            if i != "time [us]" and j < 2000:
                data[i][j]=0
            else: break
            j+=1
return data

```

```

##### WCZYTANIE DANYCH #####
#####

```

```

# data21 = wczytanie_danych("test2.csv","TESTY-H2-pow_fi08_101121","ch 3")
# text21 = wczytanie_danych("test2_t.csv","TESTY-H2-pow_fi08_101121")

```

```

# data22 = wczytanie_danych("test3.csv","TESTY-H2-pow_fi08_101121","ch 3")
# text22 = wczytanie_danych("test3_t.csv","TESTY-H2-pow_fi08_101121")

```

```

# data23 = wczytanie_danych("test4.csv","TESTY-H2-pow_fi08_101121","ch 3")
# text23 = wczytanie_danych("test4_t.csv","TESTY-H2-pow_fi08_101121")

```

```

##### FUNKCJA TWORZACA WYKRESY #####
#####

```

```

def funkcja(data1,text1,numer,tr_SN, tr_SN_f2, tr_SJ, tr_SN2, czas_zbior, V_max, V_CJ, aP, t_d,tak):

```

```

##### TWORZENIE KOPII #####
data = data1[:]

```

```

##### Obliczanie TOA_P dla kanałów bez sond jonizacyjnych #####

```

```

temp = []

```

```

l = -1
for i in data1:
    if i != "time [us]" and l < 2:
        k = -1
        for j in data1[i]:
            k += 1
            if data1[i][k] > tr_SN2:
                temp.append(data1["time [us]"][k]/1000)
                break
    l += 1

#####
list1=[]
for i in text1["Tabela"]:
    l=0
    for j in xxx["SN"]:
        if j in i:
            print("Czujnik: ", j)
            list1.append(xxx["VMPA"][l])
    l+=1

##### Pobieranie wspolrzednych i opisow #####
pattern = "\](.*?)\["
list2=[]
print("\n")
l=0

# Zczytanie pozycji z czujnika
for i in text1["Tabela"]:
    if i != "time [us]":
        if "POS" in i:
            substring = re.search(pattern, i).group(1)
            list2.append(float(substring))

# Zczytanie opisu eksperymentu
for i in text1["Tabela"]:
    if i != "time [us]":
        if "[EXP_DESC_s]" in i:
            opis = i
            break

for i in text1["Tabela"]:
    if i != "time [us]":
        if "/EXP_DESC_s" in i:
            opis = opis + " " + i
            break
    opis = re.search(pattern, opis).group(1)

##### TWORZENIE DATAFRAME Z DANYMI CZUJNIKOW #####
#####
d = {'Kanal': range(1,9), 'VPMA': list1, "Odleglosc": list2[:8]}
df1 = pd.DataFrame(data=d)

l=-1

```

```
#####
# PRZELICZENIE NA MPa CZUJNIKOW #####
for i in data1:
    if i != "time [us]" and l < 8:
        data1[i] = data1[i]/df1["VPMA"][l]+0.1
    l+=1
    if tak == 1:
        if l>8 and l<12:
            data1[i] = data1[i]*1.7
#####
#
```

```
#####
# WYKRES ODCZYTÓW CZUJNIKÓW #####
#
```

```
fig1 = plt.figure("data" + numer, figsize=(16, 9), dpi=150)
plt.clf()
```

```
fig1.suptitle(opis, fontsize=20)
```

```
ax1=plt.subplot(211)
plt.style.use('seaborn-deep')
plt.xlabel("Czas [us]", fontsize=15)
plt.ylabel("P [MPa]", fontsize=15)
plt.grid(color='#717171', linestyle='--', linewidth=0.3)
#plt.ylim(0,1)
plt.xlim(2000,t_d)
color = cm.rainbow(np.linspace(0, 1, 8))
for i,c in zip(range(1,9),color):
    plt.plot(data1["time [us]"],data1["ch "+ str(i)], linewidth=1.5, label = "ch"+ str(i) + " SN", c=c)
    plt.legend(loc="upper left", fontsize=11)
    plt.tick_params(axis='both', labelsize=14)
```

```
ax1=plt.subplot(212)
plt.style.use('seaborn-deep')
plt.xlabel("Czas [us]", fontsize=15)
plt.ylabel("U [V]", fontsize=15)
plt.grid(color='#717171', linestyle='--', linewidth=0.3)
plt.ylim(0,1)
plt.xlim(2000,t_d)
for i in range(1,15):
    if i > 8:
        plt.plot(data1["time [us]"],data1["ch "+ str(i)], linewidth=1.5, label = "ch"+ str(i) + " SJ", c=color[i-7] )
        plt.legend(loc="upper left", fontsize=11)
        plt.tick_params(axis='both', labelsize=14)
```

```
fig1.tight_layout()
```

```
list3=temp
list4=[0.1,4]
l=-1
```

```
#####
# WYKRES ZBIORCZY #####
#
```

```

fig4 = plt.figure("Zbiorczy" + numer, figsize=(16, 9), dpi=150)
plt.clf()

fig4.suptitle(opis, fontsize=20)
zbiorczy = plt.subplot(111)

plt.style.use('seaborn-deep')
plt.xlabel("Czas [us]", fontsize=15)
plt.ylabel("P[MPa] + x[m]", fontsize=15)
plt.grid(color='#717171', linestyle='--', linewidth=0.3)
plt.xlim(2000,t_d)
color = cm.rainbow(np.linspace(0, 1, 8))
for i, c in zip(range(1,9),color):
    plt.plot(data1["time [us]"],data1["ch "+ str(i)] + df1["Odlegosc"][i-1],
              linewidth=1, label = "ch"+ str(i) + " SN, " + str(df1["Odlegosc"][i-1])+" m", c=c)
plt.tick_params(axis='both', labelsize=14)
plt.legend(loc="upper left", fontsize=13)
plt.tight_layout()

data1.drop('ch 1',
           axis='columns', inplace=True)
data1.drop('ch 2',
           axis='columns', inplace=True)

##### USTALENIE KIEDY DOTARŁ PLOMIEN I FALA DO CZUJNIKOW #####
#####

for i in data1:
    if i != "time [us]" and i < 6:
        k=-1
        for j in data1[i]:
            k+=1
            if data1[i][k] > tr_SN:
                list3.append(data1["time [us]"][k]/1000)
                break
    elif i != "time [us]":
        k=-1
        for j in data1[i]:
            k+=1
            if data1[i][k] > tr_SJ:
                list4.append(data1["time [us]"][k]/1000)
                break
    l+=1

list4[1]=list4[2]*list2[1]/list2[2]
df1["TOA_P [ms]"]=list3
df1["TOA_V [ms]"]=list4

##### WYKRES TOA #####
fig2 = plt.figure("TOA" + str(numer), figsize=(16, 9), dpi=150)
plt.clf()

```

```
fig2.suptitle('ToA\n' + opis, fontsize=20)
```

```
plt.style.use('seaborn-deep')
plt.xlabel("Dystans [m]", fontsize=15)
plt.ylabel("Czas [ms]", fontsize=15)
plt.grid(color='#717171', linestyle='--', linewidth=0.3)
plt.xlim(0,3)
plt.tick_params(axis='both', labelsize=14)
```

```
plt.plot([0,df1["Odlegosc"][0]],[0,df1["TOA_P [ms]"][0]], linestyle='--', color="g")
plt.plot([0,df1["Odlegosc"][2]],[0,df1["TOA_V [ms]"][2]], linestyle='--', color="b")
```

```
plt.plot(df1["Odlegosc"],df1["TOA_P [ms]"], color="g", label="Fala cisnieniowa",marker="o")
plt.plot(df1["Odlegosc"][2:],df1["TOA_V [ms]"][2:], color="b", label="Front plomienia",marker="o")
plt.legend(fontsize=15, loc="upper left")
plt.tight_layout()
```

```
##### SREDNIA ODLEGLOSC POMIEDZY CZUJNIKAMI #####
```

```
list5=[0]
l=1
for i in df1["Odlegosc"]:
    if l<8:
        list5.append((df1["Odlegosc"][l]+df1["Odlegosc"][l-1])/2)
    l+=1
df1["Srednia odlegosc"]=list5
```

```
##### PREDKOSC FALI CISNIENIOWEJ #####
```

```
list6=[0]
l=1
print("\nEksperyment: "+numer)
for i in df1["TOA_P [ms]"]:
    if l<8:
        if (df1["Odlegosc"][l]-df1["Odlegosc"][l-1])/(df1["TOA_P [ms]"][l]-df1["TOA_P [ms]"][l-1])>100:
            list6.append(0)
        else:
            list6.append((df1["Odlegosc"][l]-df1["Odlegosc"][l-1])*1000/(df1["TOA_P [ms]"][l]-df1["TOA_P [ms]"][l-1]))
            print("Odlegosc "+str(l+1)+" i", str(l),":", df1["Odlegosc"][l],",", df1["Odlegosc"][l-1], ";TOAP1-2:", df1["TOA_P [ms]"][l],",", df1["TOA_P [ms]"][l-1], ", droga: ", round((df1["Odlegosc"][l]-df1["Odlegosc"][l-1]), 3))
    l+=1
df1["Predkosc P"]=list6
```

```
##### PREDKOSC PLOMIENIA #####
```

```
list7=[0]
l=1
for i in df1["TOA_V [ms]"]:
```

```

if l<8:
    if (df1["Odlegosc"][[l]-df1["Odlegosc"][[l-1]]/(df1["TOA_V [ms]"][[l]-df1["TOA_V [ms]"][[l-1]]]>100:
        list7.append(0)
    else:
        list7.append((df1["Odlegosc"][[l]-df1["Odlegosc"][[l-1]]*1000/(df1["TOA_V [ms]"][[l]-df1["TOA_V [ms]"]
    "][[l-1]]))
        print("Odlegosc "+str(l+1)+" i", str(l)," :", df1["Odlegosc"][[l]],",", df1["Odlegosc"][[l-1]], ",TOAV1-2:",
              df1["TOA_V [ms]"][[l]],",", df1["TOA_V [ms]"][[l-1]])
        l+=1
df1["Predkosc V"] = list7

j=-1
for p,v in zip(list6,list7):
    j+=1
    if j < 7 and (abs(p) > V_max or (list6[j-1]>0 and list6[j+1]>0 and p < 0)
                  or (p > 2*(list6[j-1]+list6[j+1])/2 and list6[j-1]>0 and list6[j+1] > 0)
                  or (p > 2*(abs(list6[j-1])+abs(list6[j+1]))/2) ):
        if (list6[j-1]<0 and list6[j+1]<0 and p < 0): list6[j] = ((list6[j-1])+(list6[j+1]))/2
        else: list6[j] = (abs(list6[j-1])+abs(list6[j+1]))/2
    elif j < 7 and (abs(v) > V_max or (list7[j-1]>0 and list7[j+1]>0 and v < 0)
                  or (v > 2*(list7[j-1]+list7[j+1])/2 and list7[j-1]>0 and list7[j+1] > 0)
                  or (v > 2*(abs(list7[j-1])+abs(list7[j+1]))/2) ):
        if (list7[j-1]<0 and list7[j+1]<0 and v < 0): list7[j] = ((list7[j-1])+(list7[j+1]))/2
        else: list7[j] = (abs(list7[j-1])+abs(list7[j+1]))/2

    else:
        list6[j]=abs(list6[j])
        list7[j]=abs(list7[j])

```

```

fig3 = plt.figure("V" + numer, figsize=(16, 9), dpi=150)
plt.clf()

```

```

fig3.suptitle('dx/dt\n' + opis + "\n", fontsize=20)

```

```

plt.style.use('seaborn-deep')
plt.xlabel("Dystans [m]", fontsize=15)
plt.ylabel("Predkosc [m/s]", fontsize=15)
plt.grid(color='#717171', linestyle='--', linewidth=0.3)

```

```

plt.plot([0,list5[1]],[0,df1["Predkosc P"][[1]], linestyle='--', color="g")
plt.plot([0,list5[3]],[0,list7[3]], linestyle='--', color="b")

```

```

plt.plot([list5[1],list5[2]],[df1["Predkosc P"][[1],list6[2]], color="g",marker="o")
plt.plot(list5[2:],list6[2:], label="Fala cisnieniowa", color="g",marker="o")
plt.plot(list5[3:],list7[3:], label="Front plomienia", color="b",marker="o")
plt.ylim(0,V_CJ+200)
plt.tick_params(axis='both', labelsize=14)

```

```

V_CJ_t = str(V_CJ)
aP_t = str(aP)
plt.plot([0,3.5], [V_CJ,V_CJ], linestyle='-.', color = "r", linewidth=1.5, alpha=0.6)
plt.plot([0,3.5], [aP,aP], linestyle='-.', color = "r", linewidth=1.5, alpha=0.6)

```

```

plt.xlim(0,3)
plt.text(0.1, V_CJ+30, r'$V_{CJ}=$'+'V_CJ_t+'[m/s]', fontsize=15)
plt.text(0.1, aP+30, r'$a_p=$'+'aP_t+'[m/s]', fontsize=15)

plt.legend(fontsize=15, loc="upper right")
plt.tight_layout()

df_temp = df1

df_temp=df_temp.drop(df_temp.index[2])

print("DF TEMP ", df_temp['Odlegosc'])

##### Linia pochyla reprezentujaca predkosc pierwszej fali #####
zbiorczy.plot(df_temp["TOA_P [ms]"]*1000, df_temp["Odlegosc"]+0.08,
               linewidth=2, color='k')

data.drop('ch 3',
          axis='columns', inplace=True)

##### USTALENIE KIEDY DOTARLA FALA DO CZUJNIKOW #####
l=-1
list_zbior = []
list_czas = []

##### CZAS DOTARCIA POWROTNEJ FALI #####
for i, o in zip(data,df_temp["Odlegosc"]):
    if i != "time [us]" and l < 6:
        k=czas_zbior
        print("Kanal ",i)
        for j in data[i]:
            k+=1
            if data[i][k] > tr_SN_f2:
                list_czas.append(data["time [us]"][k])
                if data[i][k]> 1.2: list_zbior.append(o+0.3)
                else: list_zbior.append(data[i][k-100]+o-0.3)
                break
        l+=1

list_czas.append(df1["TOA_P [ms]"][7]*1000)
list_zbior.append(df_temp["Odlegosc"][7]+0.08)
list_czas = list_czas[:7]

list_czas = list_czas[::-1]

#####
##### Wartosci cisnien ToA powrotnej fali #####
j=0
for i in df_temp["Odlegosc"]:
    if j < 7: list_zbior.append(i+tr_SN_f2)
    j+=1

```

```

"""
list_zbior = list_zbior[::-1]

print("List zbior", list_zbior)
print("List czas", list_czas)

##### Linia pochyla reprezentujaca fale powrotna #####
war_y = df_temp["Odleglosc"][:-1]+0.08

zbiorczy.plot(list_czas, war_y,
              linewidth=2, color='k')

##### OPOZNIONY ZAPLON #####
predkosc_powrotn = (1000000*(df_temp["Odleglosc"][7]-df_temp["Odleglosc"][6]))/(list_czas[1]-list_czas[0])

opoz_zapl = (df1['TOA_V [ms]'][7]-df1['TOA_P [ms]'][7])*1000
print("\nOPOZNIENIE ZAPLONU:",opoz_zapl,"[us]\n")
print("OSTATNIA PREDKOSC:", round(list6[7],1),"[m/s]\n")
print("PREDKOSC POWROTNA", round(predkosc_powrotn,1), "[m/s]\n")

return (df1, opoz_zapl)

#####
#####

##### WYSWIETLENIE WYKRESOW #####
#####

##### TESTY-H2-pow_fi08_101121 #####
#####

# df21=funkcja(data21,text21,"21",0.17,0.188,0.09,0.1,4700,1100,1870.7,946.5,13500,0)
# df22=funkcja(data22,text22,"22",0.17,0.22,0.2,0.17,9900,1100,1870.7,946.5,13500,0)
# df23=funkcja(data23,text23,"23",0.17,0.25,0.098,0.2,9900,1100,1870.7,946.5,13000,0)

#####

##### ZBIORCZY #####
#####

dane_f1 = pd.read_csv("https://raw.githubusercontent.com/RusieckiFilip/PracaInz/main/zbiorczy_f1.csv", sep = ";")

dane_f08 = pd.read_csv("https://raw.githubusercontent.com/RusieckiFilip/PracaInz/main/zbiorczy_f08.csv", sep = ";")
dane_f16 = pd.read_csv("https://raw.githubusercontent.com/RusieckiFilip/PracaInz/main/zbiorczy_f16.csv", sep = ";")

```

```
;"")
dane_f128 = pd.read_csv("https://raw.githubusercontent.com/RusieckiFilip/PracaInz/main/zbiorczy_f128.csv", sep
= ";")
```

```
dane_f08 = dane_f08.append({'predkosc':606.9,'ITD.':12,'kat':0,'Cisnienie': 3.3},ignore_index=True)
dane_f08 = dane_f08.append({'predkosc':565,'ITD.':2758,'kat':2,'Cisnienie': 1.9},ignore_index=True)
```

```
##### zmienianie kategorii na opozniony i szybki
```

```
for i, j in zip(dane_f1["ITD."], range(len(dane_f1["ITD."]))):
    if i > 3 and i <= 100:
        dane_f1["kat"][j]=0
for i, j in zip(dane_f08["ITD."], range(len(dane_f08["kat"]))):
    if i > 3 and i <= 100:
        dane_f08["kat"][j]=0
for i, j in zip(dane_f16["ITD."], range(len(dane_f16["kat"]))):
    if i > 3 and i <= 100:
        dane_f16["kat"][j]=0
for i, j in zip(dane_f128["ITD."], range(len(dane_f128["kat"]))):
    if i > 11 and i <= 100:
        dane_f128["kat"][j]=0
```

```
M_1 = 407.3
M_08 = 395.8
M_16 = 437.7
M_128 = 422.3
```

```
w = 0.4 # bar width
x = [1,2,3,4] # x-coordinates of your bars
colors = [(0, 0, 1, 1), (1, 0, 0, 1),"k", '#04FF03'] # corresponding colors
y = [dane_f1["ITD."],dane_f08["ITD."],dane_f16["ITD."],dane_f128["ITD."]]
```

```
fig, ax = plt.subplots()
```

```
fig.suptitle('Opoznenie zaplonu od stezenia mieszaniny', fontsize=23)
```

```
plt.style.use('seaborn-deep')
plt.xlabel("Wspolczynik ekwiwalencji", fontsize=17)
plt.ylabel("Opoznenie zaplonu [us]", fontsize=17)
plt.grid(color='#717171', linestyle='--', linewidth=0.3)
plt.yscale("log")
```

```
plt.tick_params(axis='both', labelsize=16)
```

```
ax.bar(x,
       height=100,
       yerr=100, # error bars
       capsize=0, # error bar cap width in points
       width=0, # bar width
       tick_label=["fi=0,8","fi=1","fi=1,28","fi=1,6"],
```

```

color=(0,0,0,0), # face color transparent
edgecolor=(0,0,0,0),
#ecolor=colors, # error bar colors; setting this raises an error for whatever reason.
)
##### tworzenie markow #####
mark1=[]
mark08=[]
mark16=[]
mark128=[]

dane_f1["Mach"] = dane_f1["predkosc"]/M_1
dane_f08["Mach"] = dane_f08["predkosc"]/M_08
dane_f16["Mach"] = dane_f16["predkosc"]/M_16
dane_f128["Mach"] = dane_f128["predkosc"]/M_128

for i in range(len(dane_f1["ITD."])):
    if dane_f1["kat"][i]==0: mark1.append("d")
    elif dane_f1["kat"][i]==1: mark1.append((5, 1))
    elif dane_f1["kat"][i]==2: mark1.append("o")
    elif dane_f1["kat"][i]==3: mark1.append("s")
    elif dane_f1["kat"][i]==4: mark1.append("^")

for i in range(len(dane_f08["ITD."])):
    if dane_f08["kat"][i]==0: mark08.append("d")
    elif dane_f08["kat"][i]==1: mark08.append((5, 1))
    elif dane_f08["kat"][i]==2: mark08.append("o")
    elif dane_f08["kat"][i]==3: mark08.append("s")
    elif dane_f08["kat"][i]==4: mark08.append("^")

for i in range(len(dane_f16["ITD."])):
    if dane_f16["kat"][i]==0: mark16.append("d")
    elif dane_f16["kat"][i]==1: mark16.append((5, 1))
    elif dane_f16["kat"][i]==2: mark16.append("o")
    elif dane_f16["kat"][i]==3: mark16.append("s")
    elif dane_f16["kat"][i]==4: mark16.append("^")

for i in range(len(dane_f128["ITD."])):
    if dane_f128["kat"][i]==0: mark128.append("d")
    elif dane_f128["kat"][i]==1: mark128.append((5, 1))
    elif dane_f128["kat"][i]==2: mark128.append("o")
    elif dane_f128["kat"][i]==3: mark128.append("s")
    elif dane_f128["kat"][i]==4: mark128.append("^")

custom_marks = [Line2D([0], [0], marker='d', color='w', label='Szybki zaplon',
                      markerfacecolor='k', markersize=17),
                Line2D([0], [0], marker='o', color='w', label='Pozny zaplon',
                      markerfacecolor='k', markersize=17),
                Line2D([0], [0], marker=(5, 1), color='w', label='Detonacja na narozu',
                      markerfacecolor='k', markersize=19),
                Line2D([0], [0], marker='^', color='w', label='Opoziona detonacja',
                      markerfacecolor='k', markersize=17),
                Line2D([0], [0], marker='s', color='w', label='Przedwczesna detonacja',
                      markerfacecolor='k', markersize=17)]

```

# f1 = 08

```

for i, m, y_ in zip(range(len(mark08)), mark08, dane_f08["ITD."]) :
    # distribute scatter randomly across whole width of bar
    ax.scatter(x[0] + np.random.random(y[1].size)[i] * w - w / 2, y_, color=colors[1], marker=m, s = 800, alpha=0.5)

# f1 = 1
for i, m, y_ in zip(range(len(mark1)), mark1, dane_f1["ITD."]) :
    # distribute scatter randomly across whole width of bar
    ax.scatter(x[1] + np.random.random(y[0].size)[i] * w - w / 2, y_, color=colors[0], marker=m, s = 800, alpha=0.5)

# f1 = 128
for i, m, y_ in zip(range(len(mark128)), mark128, dane_f128["ITD."]) :
    # distribute scatter randomly across whole width of bar
    ax.scatter(x[2] + np.random.random(y[3].size)[i] * w - w / 2, y_, color=colors[3], marker=m, s = 800, alpha=0.5)

# f1 = 16
for i, m, y_ in zip(range(len(mark16)), mark16, dane_f16["ITD."]) :
    # distribute scatter randomly across whole width of bar
    ax.scatter(x[3] + np.random.random(y[2].size)[i] * w - w / 2, y_, color=colors[2], marker=m, s = 800, alpha=0.5)

plt.legend(handles = custom_marks, fontsize=19, loc="upper center")
plt.tight_layout()

```

```

#####
##### WYKRES ITD i CISNIENIA OD PREDKOSCI #####
#####

def pred(dane_f1, fi,dg,gg):
    fig1 = plt.figure("IDT(V) "+fi,figsize=(16, 9), dpi=150)
    plt.clf()

    fig1.suptitle("IDT(V) " + fi, fontsize=17)

    plt.style.use('seaborn-deep')
    plt.xlabel("Predkosc [m/s]", fontsize=13)
    plt.ylabel("IDT [us]", fontsize=13)
    plt.grid(color='#717171', linestyle='--', linewidth=0.3)
    #plt.ylim(0,2.5)
    #plt.xlim(2000,12000)
    plt.scatter(dane_f1["predkosc"],dane_f1["ITD."])
    plt.yscale("log")
    plt.xlim(dg,gg)

    #plt.legend(loc="upper left", fontsize=11)
    #plt.tick_params(axis='both', labelsize=12)

    fig1.tight_layout()

pred1 = pred(dane_f1,"fi = 1",600,950)
pred2 = pred(dane_f08,"fi = 0,8",550,650)
pred3 = pred(dane_f16,"fi = 1,6",620,750)
pred4 = pred(dane_f128,"fi = 1,28",600,900)

```

```

fig1 = plt.figure("IDT(V)", figsize=(16, 9), dpi=150)
plt.clf()

fig1.suptitle("IDT(V)", fontsize=17)

plt.style.use('seaborn-deep')
plt.xlabel("Predkosc [m/s]", fontsize=13)
plt.ylabel("IDT [us]", fontsize=13)
plt.grid(color='#717171', linestyle='--', linewidth=0.3)

plt.scatter(dane_f1["predkosc"], dane_f1["ITD."], c=(0, 0, 1, 1), label = "fi = 1")
plt.scatter(dane_f08["predkosc"], dane_f08["ITD."], c=(1, 0, 0, 1), label = "fi = 0,8")
plt.scatter(dane_f16["predkosc"], dane_f16["ITD."], c='k', label = "fi = 1,6")
plt.scatter(dane_f128["predkosc"], dane_f128["ITD."], c="#04FF03", label = "fi = 1,28")

plt.plot([623.4,757.6],[3.808,26.3], linestyle='-.', color = "r", linewidth=1.3, alpha=0.8)
plt.plot([725,850],[2.5,2.5], linestyle='-.', color = "r", linewidth=1.3, alpha=0.8)
plt.plot([560,735],[100,100], linestyle='-.', color = "r", linewidth=1.3, alpha=0.8)

plt.text(750,10,"Opoziona detonacja", fontsize = 15)
plt.text(875,1.8,"Detonacja w narozu", fontsize = 15)
plt.text(725,55,"Szybki zaplon", fontsize = 15)
plt.text(725,350,"Pozny zaplon", fontsize = 15)

plt.yscale("log")
plt.xlim(550,950)

plt.legend(loc="upper right", fontsize=11)
plt.tick_params(axis='both', labelsize=12)

fig1.tight_layout()

```

```

k1 = dane_f1[dane_f1["kat"] != 3][:]
k16 = dane_f16[dane_f16["kat"] != 3][:]
k08 = dane_f08[dane_f08["kat"] != 3][:]

```

```

fig2 = plt.figure("IDT(p)", figsize=(16, 9), dpi=150)
plt.clf()

fig2.suptitle("IDT(p)", fontsize=17)

plt.style.use('seaborn-deep')

```

```

plt.xlabel("Cisnienie [MPa]", fontsize=13)
plt.ylabel("IDT [us]", fontsize=13)
plt.grid(color="#717171", linestyle='--', linewidth=0.3)

plt.scatter(k1["Cisnienie"],k1["ITD."], c=(0, 0, 1, 1), label = "fi = 1")
plt.scatter(k08["Cisnienie"],k08["ITD."], c=(1, 0, 0, 1), label = "fi = 0,8")
plt.scatter(k16["Cisnienie"],k16["ITD."], c='k', label = "fi = 1,6")
plt.scatter(dane_f128["Cisnienie"],dane_f128["ITD."], c='#04FF03', label = "fi = 1,28")

```

```
plt.plot([10.2,10.2],[0.8,160], linestyle='-.', color = "r", linewidth=1.3, alpha=0.8)
```

```

plt.text(10.6,85,"Zakres detonacji", fontsize = 17)
plt.text(3.35,85,"Zakres deflagracji", fontsize = 17)

```

```

plt.yscale("log")
#plt.xlim(550,950)

```

```

plt.legend(loc="upper right", fontsize=11)
plt.tick_params(axis='both', labelsize=12)

```

```
fig2.tight_layout()
```

```
#####
kopia = pd.concat([dane_f1[:,],dane_f08[:,],dane_f16[:,],dane_f128[:,]], ignore_index=True)
```

```

kopia = kopia.drop(index=[11,16,22], axis=0)
kopia = kopia.dropna()

```

```

# #polynomial fit with degree = 2
# model = np.poly1d(np.polyfit(kopia['Mach'], kopia['Cisnienie'], 1))

```

```

# #add fitted polynomial line to scatterplot
# polyline = np.linspace(1, 60, 50)

```

```

def exp_fit(x,a,b,c):
    y = a*np.exp(b*x)+c
    return y

```

```

fit = op.curve_fit(exp_fit,kopia['Mach'], kopia['Cisnienie'])
fit_eq = fit[0][0]*np.exp(fit[0][1]*kopia['Mach'])+fit[0][2]

```

```

df = pd.DataFrame(columns = ["Mach","Dopasowanie"])
df["Mach"] = kopia["Mach"]
df["Dopasowanie"] = fit_eq

```

```

df = df.sort_values(by="Mach",ignore_index=True)
#####

```

```

fig3 = plt.figure("p(M)", figsize=(16, 9), dpi=150)
plt.clf()

fig3.suptitle("p(M)", fontsize=17)

plt.style.use('seaborn-deep')
plt.xlabel("Mach [-]", fontsize=13)
plt.ylabel('$\Delta p$ [MPa]", fontsize=13)
plt.grid(color="#717171", linestyle='--', linewidth=0.3)

plt.scatter(dane_f1["Mach"],dane_f1["Cisnienie"]-0.1, c=(0, 0, 1, 1), label = "fi = 1")
plt.scatter(dane_f08["Mach"],dane_f08["Cisnienie"]-0.1, c=(1, 0, 0, 1), label = "fi = 0,8")
plt.scatter(dane_f16["Mach"],dane_f16["Cisnienie"]-0.1, c='k', label = "fi = 1,6")
plt.scatter(dane_f128["Mach"],dane_f128["Cisnienie"]-0.1, c='#04FF03', label = "fi = 1,28")
plt.plot(df["Mach"],df["Dopasowanie"])
plt.text(1.8,16,r"0.225 \cdot e^{2.24x}-4.4", fontsize=15)

#plt.plot(polyline, model(polyline))

plt.xlim(1.25,2.2)

plt.legend(loc="best", fontsize=11)
plt.tick_params(axis='both', labelsize=12)

fig3.tight_layout()

```