



Badania cieplno-przepływowe prowadzone w instalacji WIW-300

dr inż. E. Borek-Kruszewska





Spis treści

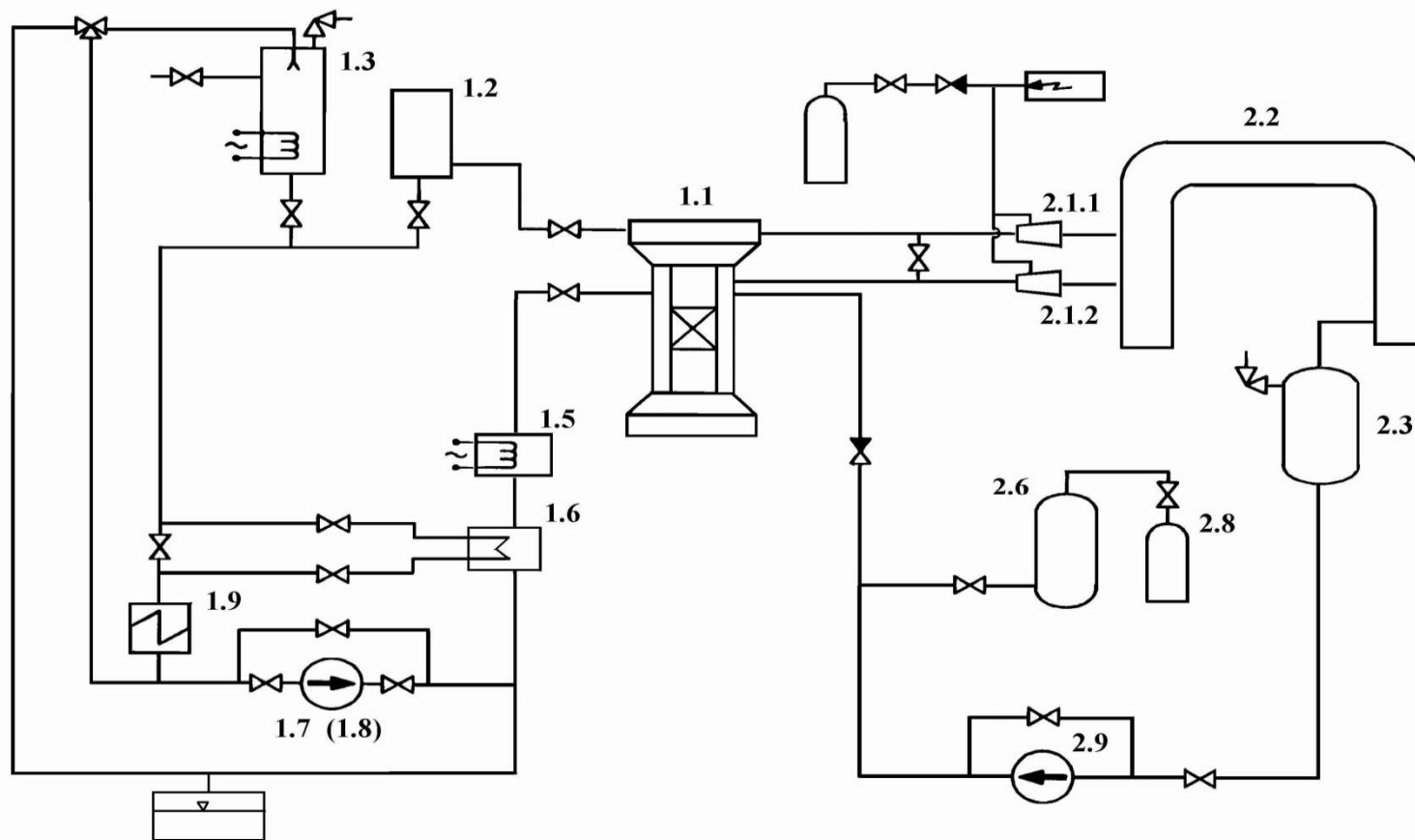
- **Wprowadzenie**
- **Opis wysokociśnieniowej instalacji wodnej WIW-300**
- **Eksperymenty cieplno-przepływowe prowadzone dla SBMEJ (1980-1995)**
- **Badania bezpieczeństwa pracy reaktora badawczego MARIA (1998-2005)**
- **Podsumowanie**



Instalacja WIW-300

- Instalacja WIW-300 jest wysokociśnieniową pętlą wodną znajdującą się na hali C budynku 19 w NCBJ.
- Instalacja zajmuje 3 piętra i wyposażona jest w suwnicę.
- Schemat WIW-300 przedstawiono poniżej.





- 1.1 – odcinek badawczy
- 1.2 – kondensator pary
- 1.3 - stabilizator ciśnienia z poduszką parową
- 1.5 – wymiennik ciepła
- 1.6 - podgrzewacz elektryczny o regulowanej mocy $N=75 \text{ kW}$
- 1.7 - główna pompa cyrkulacyjna CEN-148 ($Q=30 \text{ m}^3/\text{h}$ i $p=0,65 \text{ MPa}$)
- 1.9 – główny wymiennik ciepła

- 2.1.1, 2.1.2 – zespół membran
- 2.2 – rozprężacz
- 2.3 – zbiornik zrzutowy
- 2.6 – Zbiorniki układu zalewania
- 2.8 – zbiornik gazów technicznych
- 2.9 – pompy UACR

Rys.1. Uproszczony schemat instalacji WIW-300



Opis WIW-300

- W sekcji badawczej grzanie jądrowe (1.1) symulowane jest ciepłem Joule z prądnicy prostownikowej o mocy 300 kW prądem stałym o parametrach: $I = 10 \text{ kA}$, $U = 30 \text{ V}$. Prąd doprowadzany jest aluminiowymi szynami do górnej części korpusu, połączonej z odcinkiem doświadczalnym, a dalej poprzez dolną część korpusu szynami z ujemnym zaciskiem przetwornicy.
- Odcinek badawczy usytuowany jest pionowo.
- Pompa CEN-148 (1.7), tłoczy wodę poprzez elektryczny podgrzewacz wstępny (1.6) do górnej części korpusu (1.1). Mieszanina parowo-wodna po wyjściu z odcinka badawczego skrapla się w kondensatorze (1.2), a woda spływa przez chłodnicę (1.5) na ssanie pompy.
- Ciśnienie w układzie uzyskuje się przez podgrzewanie wody w stabilizatorze ciśnienia (1.3) i podgrzewaczu wstępnym (1.6).
- Przepływ chłodziwa sterowany jest za pomocą zaworów regulacyjnych.



**Widok na
instalację
WIW-300**



Zbiorniki UACR





Odcinek badawczy



Stabilizator ciśnienia



**Główna
pompa
cyrkulacyjna
CEN-148**

Rozprężacz



Zespół membran





**Zbiornik
zrzutowy**



Panel sterujący





Historia pracy instalacji WIW-300

W latach 1980-1998 prowadzono w instalacji WIW-300 symulacje awarii dla SBMEJ Żarnowiec, takich jak:

- LOCA
- SB-LOCA
- Zalewanie (Reflooding).

W latach 1998-2006 prowadzono badania eksperymentalne warunków bezpieczeństwa pracy reaktora badawczego MARIA przy podwyższonych parametrach eksploatacyjnych.



Badania bezpieczeństwa pracy reaktora badawczego MARIA

- 1. Określenie maksymalnych, dopuszczalnych strumieni cieplnych, przy których nie zacznie się rozwijać zjawisko wrzenia w kanale elementu paliwowego w stanie nieustalonym reaktora MARIA, jakim jest zanik przepływu chłodziwa po awarii układu zasilania agregatów pompowych (LOFA).**
- 2. Określenie maksymalnych, dopuszczalnych obciążeń cieplnych powierzchni wewnętrznej pręta kompensacyjnego reaktora MARIA.**
- 3. Wizualizacja procesu wrzenia w warunkach przepływu o charakterze przejściowym w geometrii pierścieniowej pręta kompensacyjnego –cel badawczy.**



1. Badanie parametrów kryzysu wrzenia w geometrii kanału paliwowego reaktora MARIA (LOFA).

Cel badań:

- Odwzorowanie w odcinku badawczym natężenia przepływu chłodziwa przez szczelinę pierścieniową pomiędzy rurami paliwowymi nr 1 i nr 2 elementu paliwowego MR-6 reaktora MARIA.
- Podczas symulowanej awarii typu LOFA - wierne odwzorowanie zaniku natężenia przepływu przez okres czasu, po którym reaktor zostanie automatycznie wyłączony .

Przebieg zmian wydatku na wlocie szczeliny podczas awarii zaniku zasilania pomp wg zależności: $Q = Q_0 / (1 + 0,28 t)$

co opisano funkcją rzeczywistą:

$$U(t) = 0,0188 t^3 - 0,2308 t^2 + 1,276 t + 0,02$$

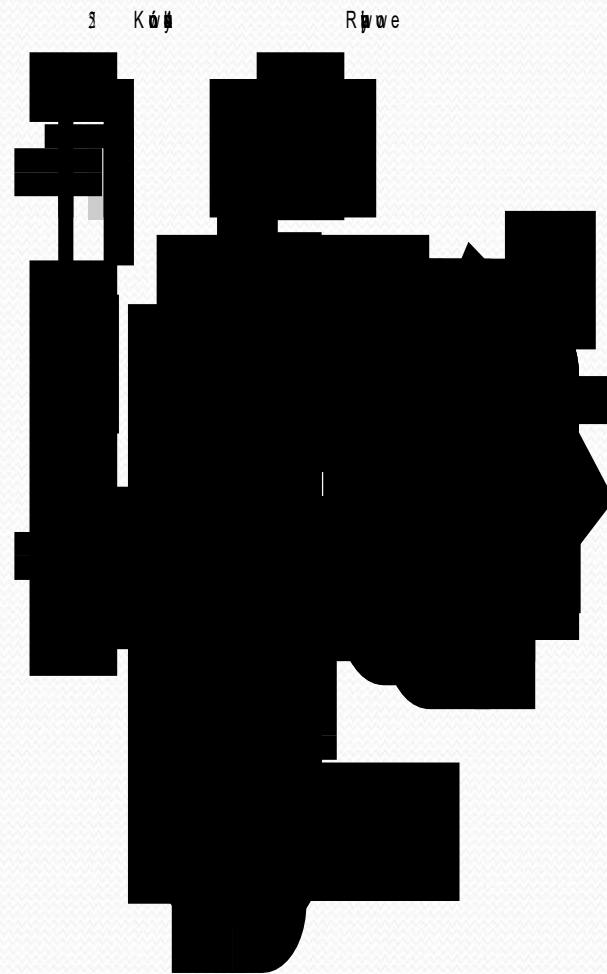
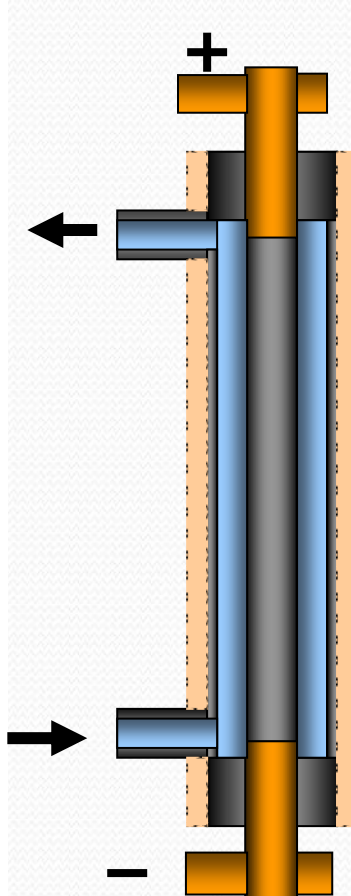
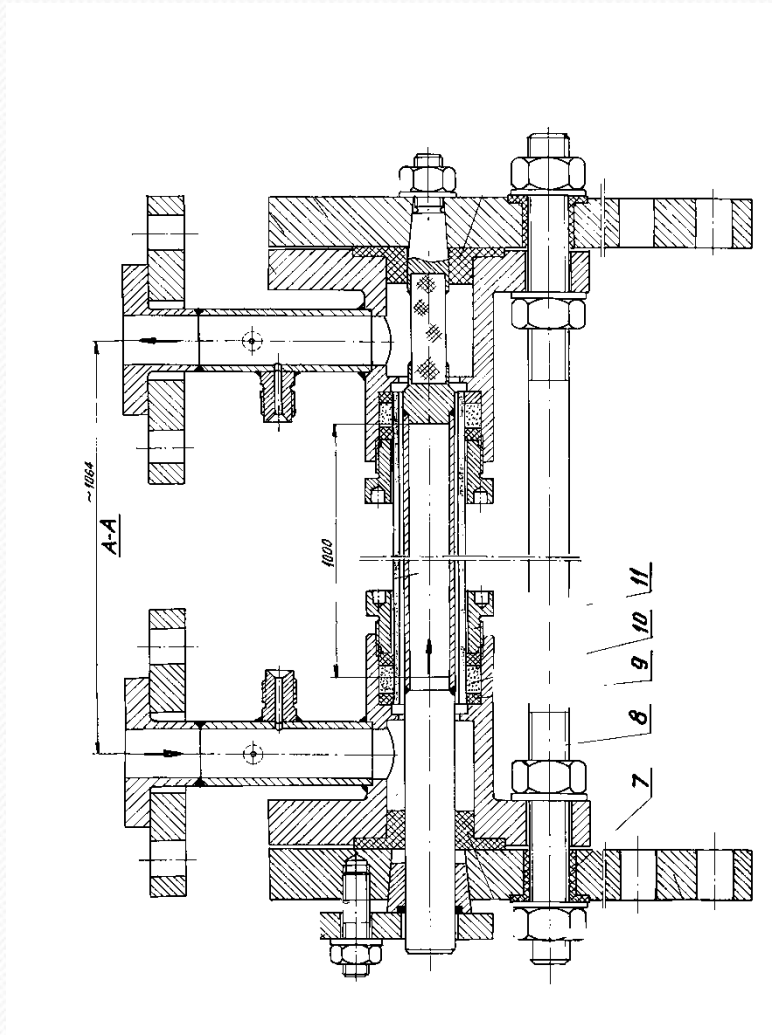


Odcinek badawczy I

- Odcinek doświadczalny zaprojektowano jako uproszczony model kanału paliwowego reaktora MARIA, imitujący szczelinę pierścieniową pomiędzy rurami nr 1 i nr 2 o szerokości 2.5 mm i długości 1m. Model szczeliny tworzyły dwa cylindryczne grzejniki elektryczne, wykonane ze stali 1H18N9T, o średnicach:
 - grzejnik wewnętrzny - $25 \times 1,5$
 - grzejnik zewnętrzny - 32.7×1.35



Konstrukcja I odcinka badawczego



Konstrukcja, model odcinka badawczego i element paliwowy MR



Badania cieplno-przepływowe typu LOFA

- Eksperymenty prowadzono przy następujących parametrach wlotowych:

ciśnienie: 0.9-1.3 MPa,

temperatura: 70-115°C,

przepływ: 5,6 m³/h.

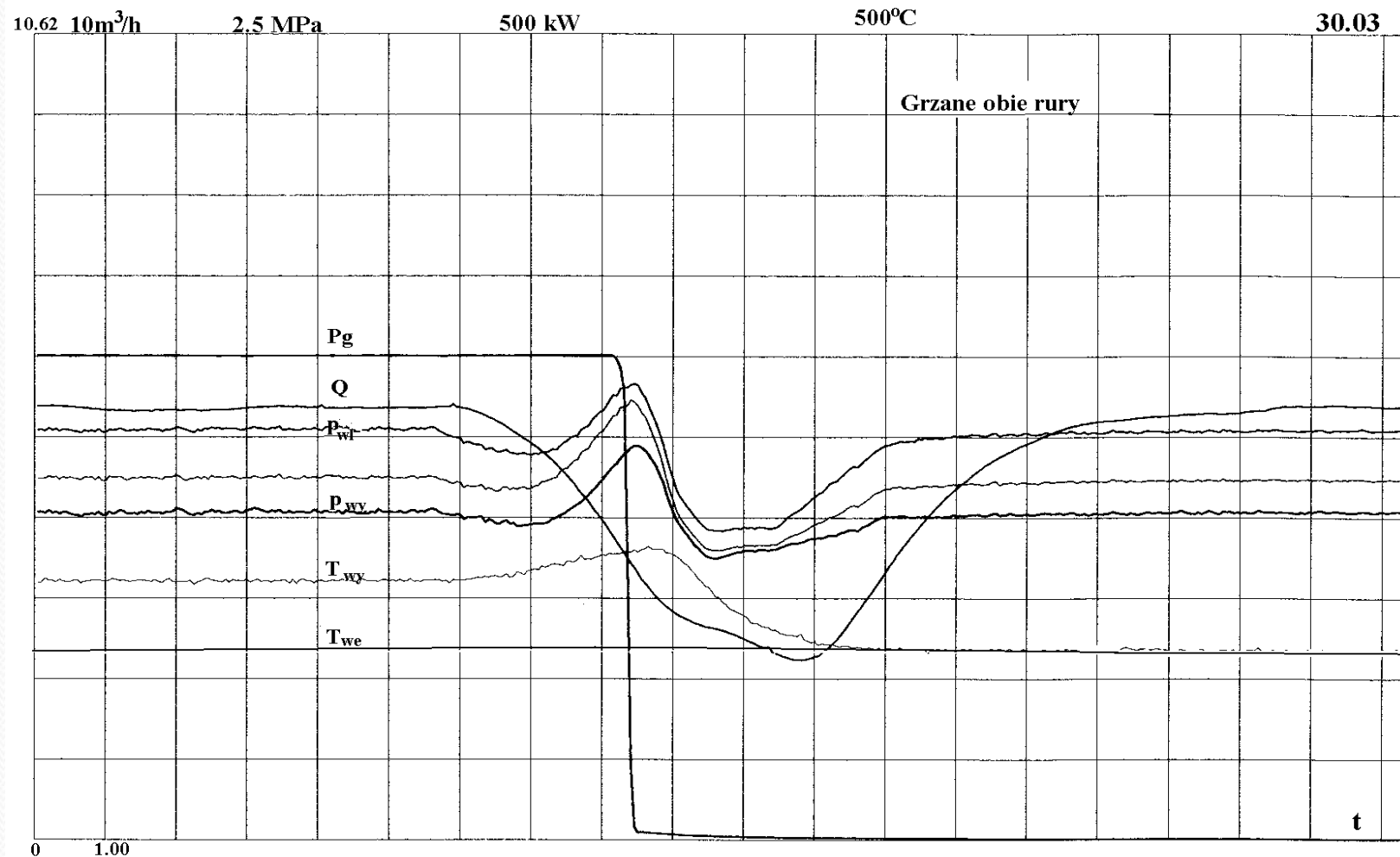
- Elementy grzane: obie rury: wewnętrzna i zewnętrzna, lub tylko wewnętrzna lub tylko zewnętrzna
- Detekcja kryzysu wrzenia: w przypadku wzrostu ciśnienia na wlocie do odcinka badawczego o 0,25 MPa w ciągu 1 sec. następowało wyłączenie grzania odcinka badawczego.



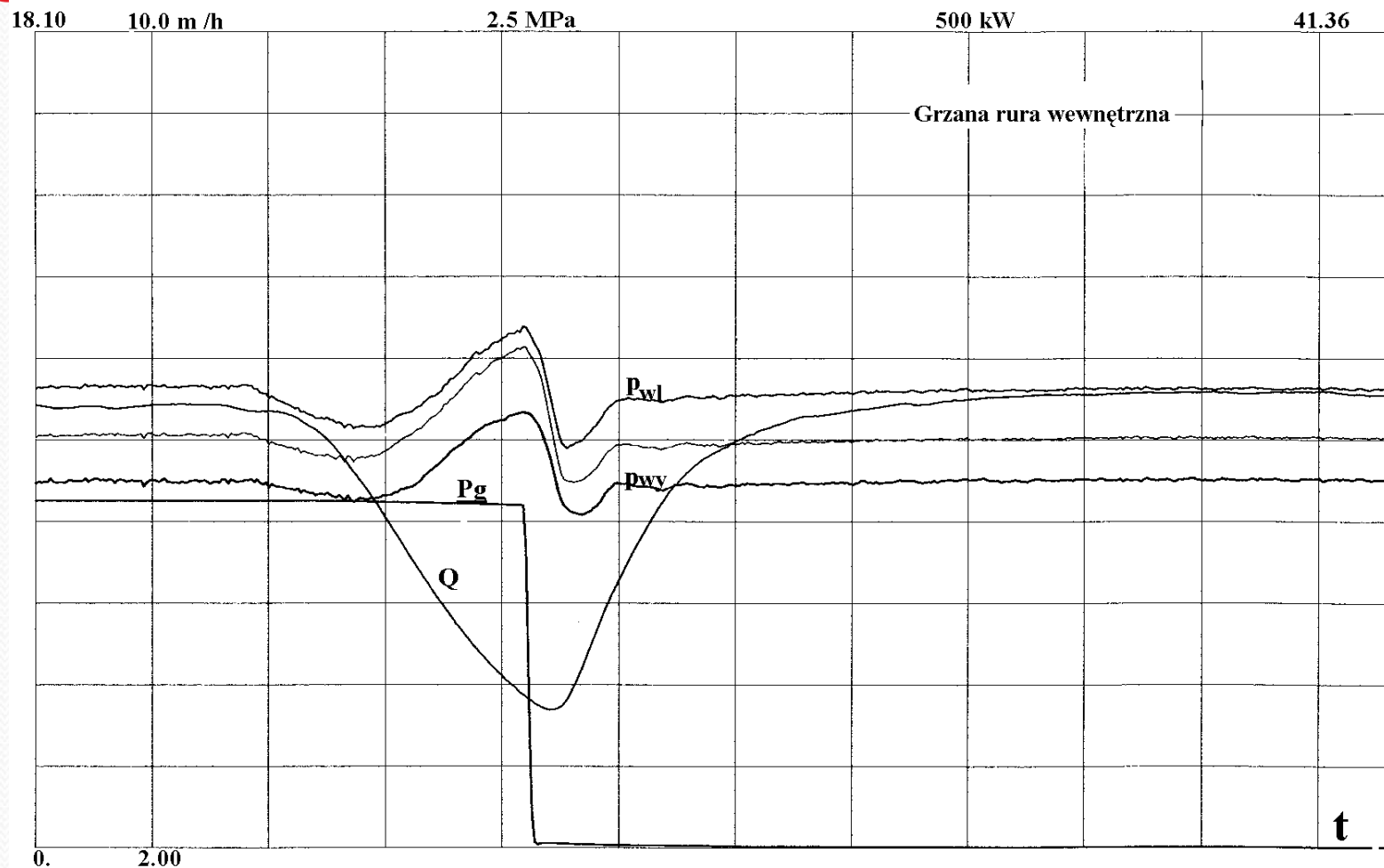
Wyniki badań eksperymentalnych

Uzyskano następujące strumienie ciepłe i temperatury na wylocie z odcinka badawczego:

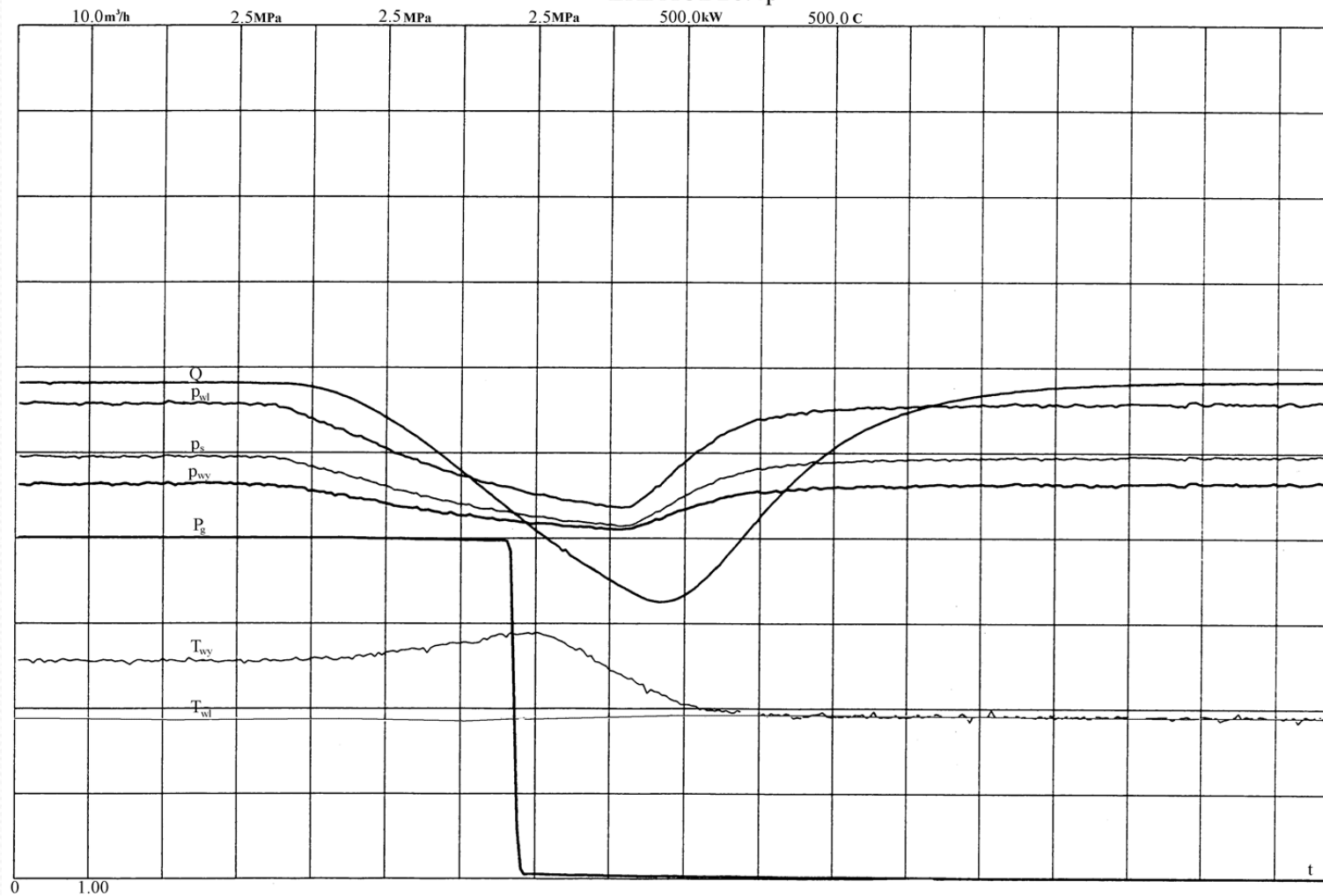
- dla obu rur grzanych, $q \approx 200 \text{ [W/cm}^2\text{]}$, $T = 180^\circ\text{C}$
- dla grzanej rury wewnętrznej, $q \approx 287 \text{ [W/cm}^2\text{]}$, $T = 170^\circ\text{C}$
- dla grzanej rury zewnętrznej, $q \approx 250 \text{ [W/cm}^2\text{]}$, $T = 170^\circ\text{C}$



Wyniki badań dla dwóch rur grzanych



Wyniki badań dla grzanej rury wewnętrznej



Wyniki badań dla grzanej rury zewnętrznej



Podsumowanie wyników badań

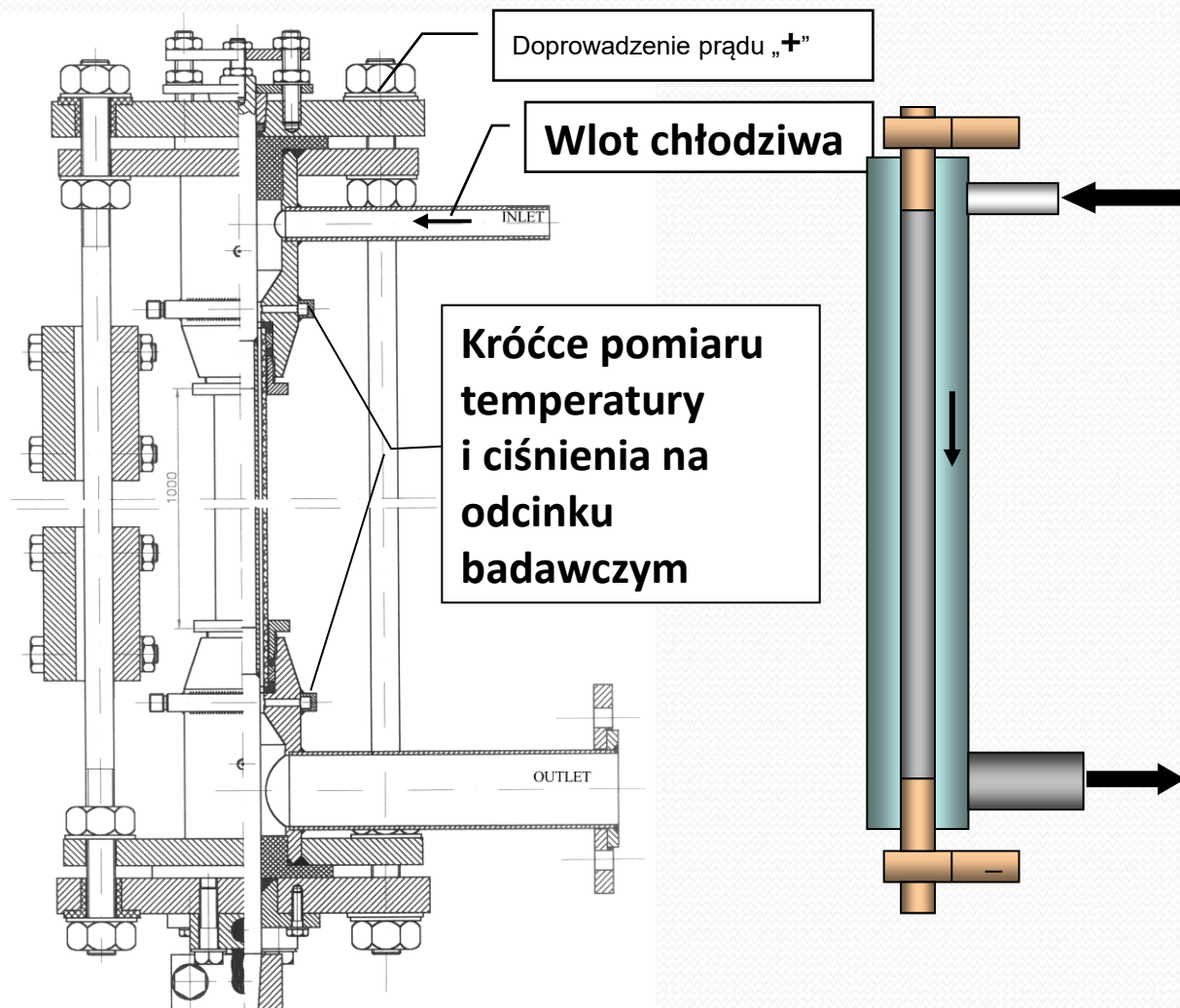
- W eksperymentach przeprowadzonych przy wyższej temperaturze wody i mniejszym natężeniu przepływu niż w elemencie paliwowym, nie zaobserwowano zjawiska wrzenia
- Uzyskano korelację na strumień krytyczny, która daje wyniki w większości bardzo nieznacznie odbiegające od otrzymanych podczas badań (błąd wzgl. ok. 8%).
- Moc cieplna elementu paliwowego może osiągnąć wartość $P_k = 2,4 \text{ MW}$. Przy tej mocy zanik zasilania podstawowego nie wywołuje pogorszenia się odbioru ciepła w stopniu mogącym wywołać uszkodzenie elementu paliwowego.



2. Określenie maksymalnych możliwych obciążeń cieplnych prętów kompensacyjnych reaktora MARIA

- Cel badań:
- Odwzorowanie rzeczywistych warunków panujących w kanale pręta kompensacyjnego reaktora MARIA.
- Temperatura chłodziwa; $20 \leq T_{wl} \leq 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Stały spadek ciśnienia na długości kanału; $0,005 \leq \Delta p \leq 0,02 \text{ MPa}$
- Ciśnienie chłodziwa na wlocie do kanału; $0,08 \leq p_{wl} \leq 0,3 \text{ MPa}$
- Średnia prędkość wody w szczelinie pierścieniowej, $U < 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, co oznacza, że przepływ ma charakter przejściowy ($Re < 10000$).

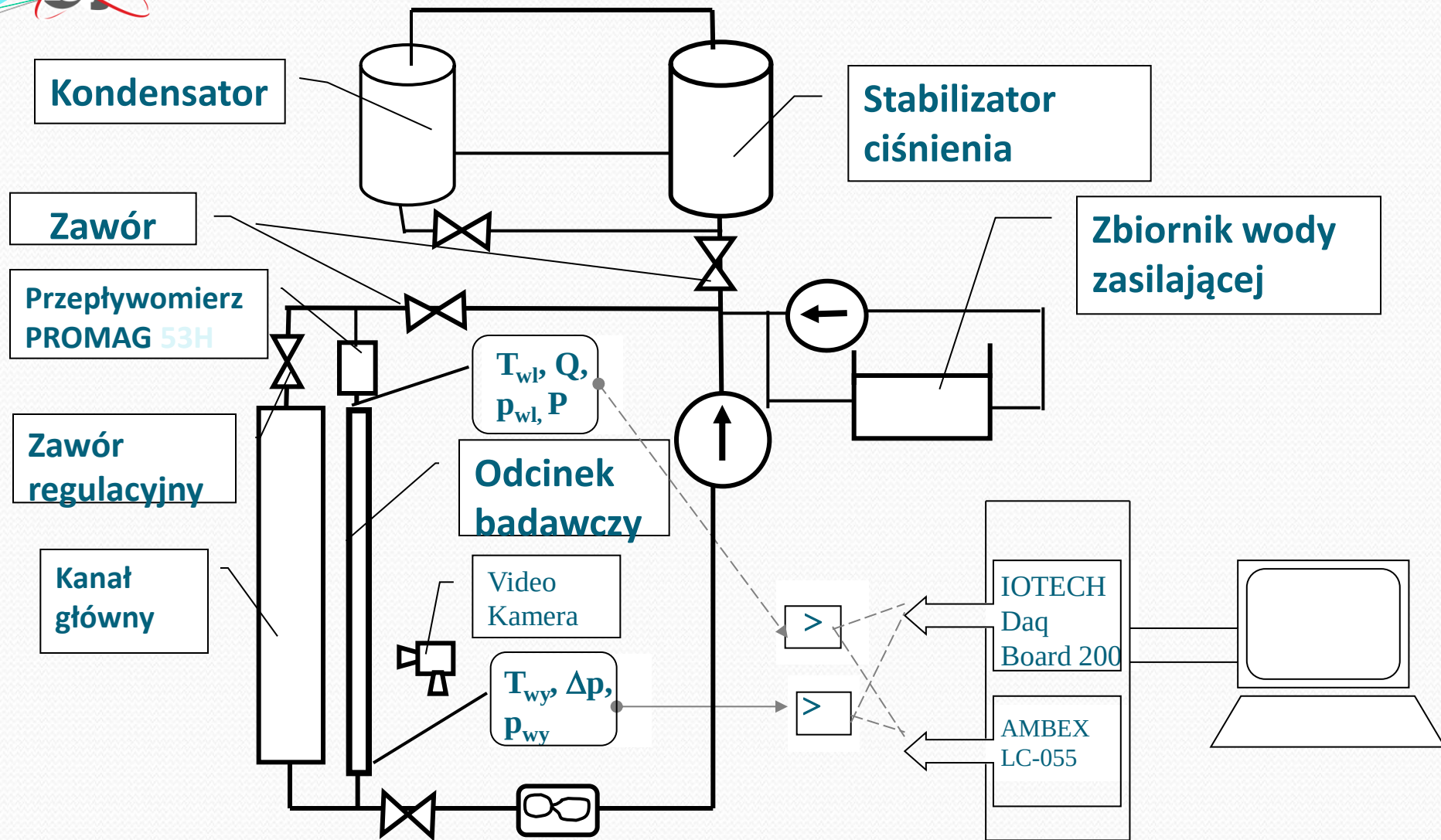
Odcinek badawczy II



Konstrukcja, model i widok odcinka badawczego



Schemat instalacji WIW-300



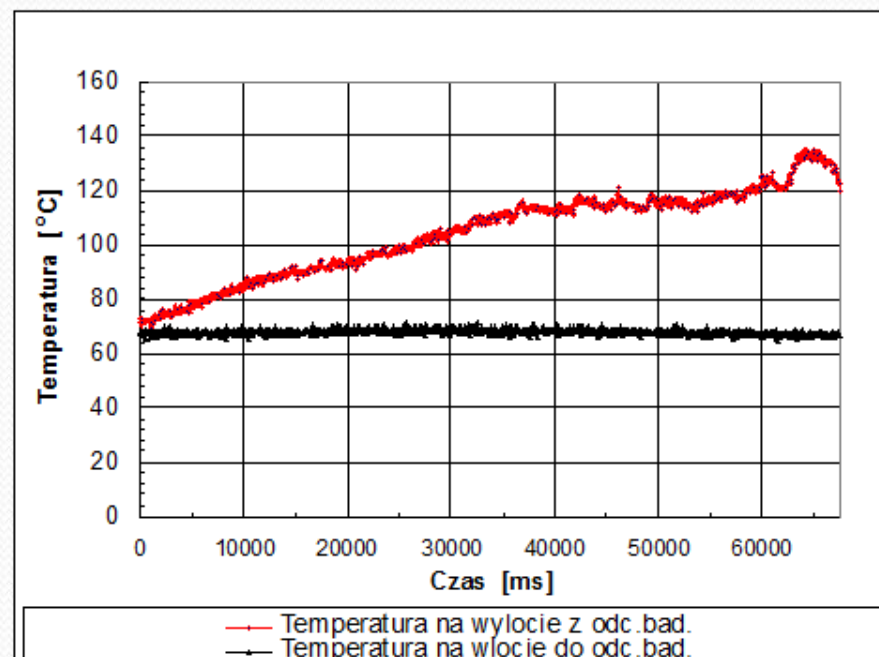
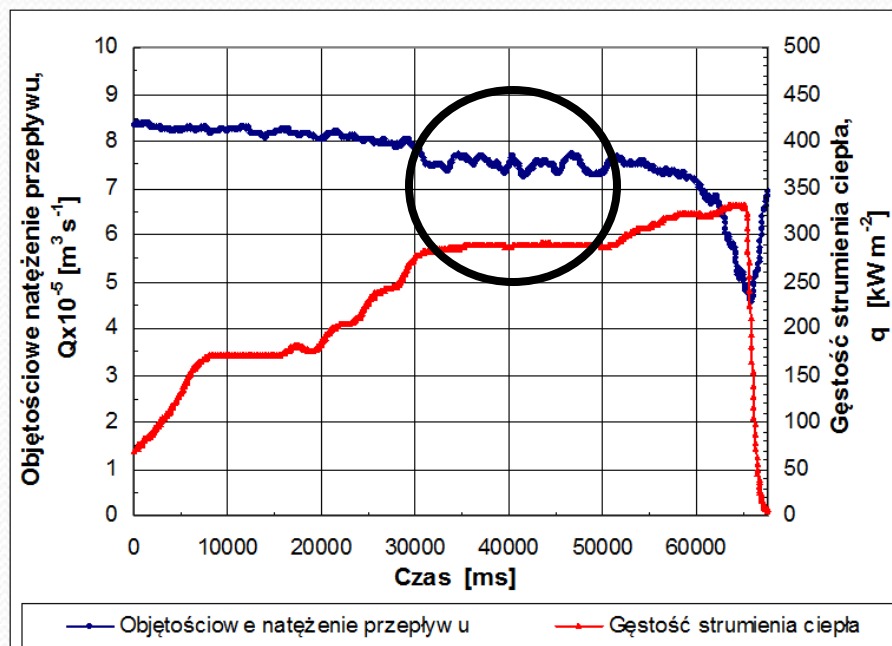


Przebieg badań eksperymentalnych

- Parametrem, określającym zakończenie eksperymentu, była założona z góry minimalna wartość natężenia przepływu chłodziwa przez odcinek badawczy. Przy ustalonych parametrach początkowych przepływu, podczas podnoszenia mocy doprowadzanej do odcinka badawczego, jeśli natężenie przepływu zmniejszyło się do założonej wartości, nastąpiło wyłączenie mocy cieplnej (począwszy od $90\%Q_0$, $80\%Q_0$, $70\%Q_0$, $60\%Q_0$, $50\%Q_0$ itd, a w ostatnich seriach na pełnej blokadzie przepływu, czyli $Q_0 = 0$).
- Przeprowadzono ok. 200 eksperymentów.



Wyniki badań

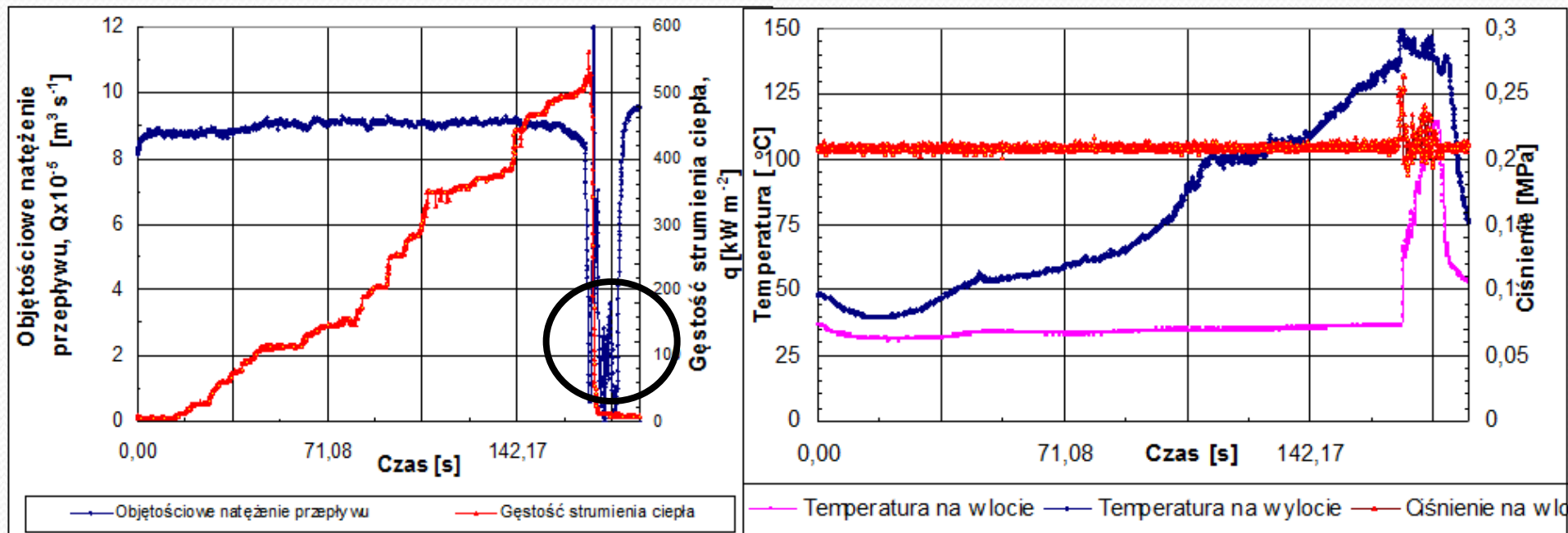


Parametry początkowe: $p_0 = 0,246 \text{ MPa}$, $G_0 = 812 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $Re = 6000$

Wyłączenie grzania dla $0,5 Q$



Typowy przebieg eksperymentu z kryzysem wrzenia



Parametry początkowe próby: $p_0=0,208 \text{ MPa}$, $G_0=892 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $Re=4400$.

Dla kryzysu wrzenia w zbocznikowanym kanale pierścieniowym charakterystyczne są:

1. Fluktuacje i zaburzenia przepływu po wyłączeniu strumienia ciepła, które powodują nieznaczny ruch odcinka w kierunku prostopadłym do przepływu i mają charakter silnych hydrodynamicznych uderzeń.
2. Skokowy przyrost ciśnienia w kanale poprzedzający skokowe zmiany temperatury.



3. Wizualizacja procesu wrzenia w warunkach przepływu przejściowego w równoległych kanałach pierścieniowych

- Wizualizację prowadzono przy zastosowaniu video kamery Kodak EHTAPRO HS Motion Analyzer z szybkością rejestracji:
- 1125 kl/s zapis ok. 7,23 s eksperymentu
- 2250 kl/s zapis ok. 3,64 s eksperymentu (eksperyment C2)
- 4500 kl/s zapis ok. 1,82 s eksperymentu
- Zarejestrowano przebieg wrzenia w postaci zdjęć o rozdzielczości 256 pikseli i 256 odcieniach szarości (8191 klatek/film).

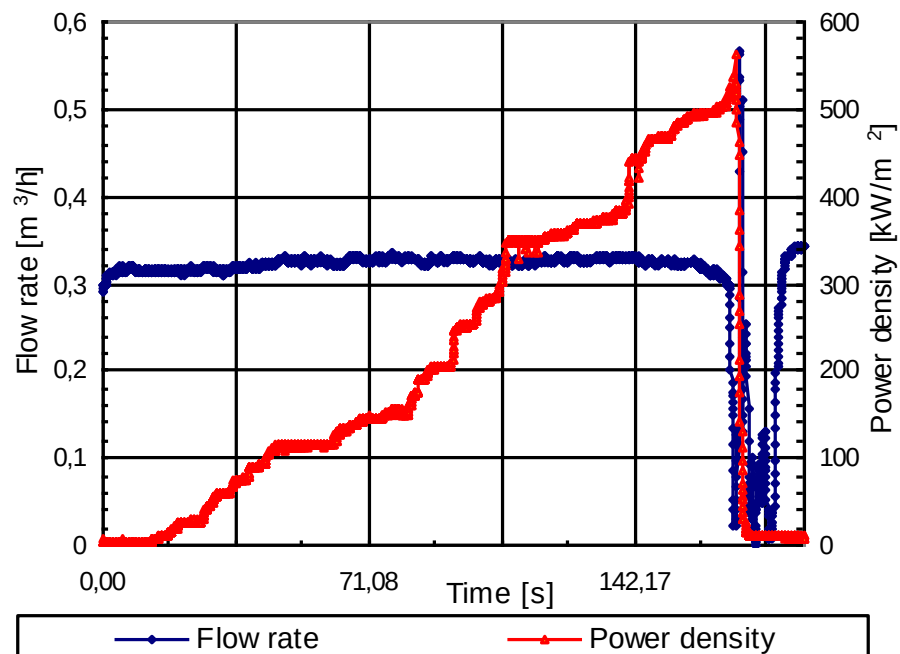


Rezultaty wizualizacji przepływu

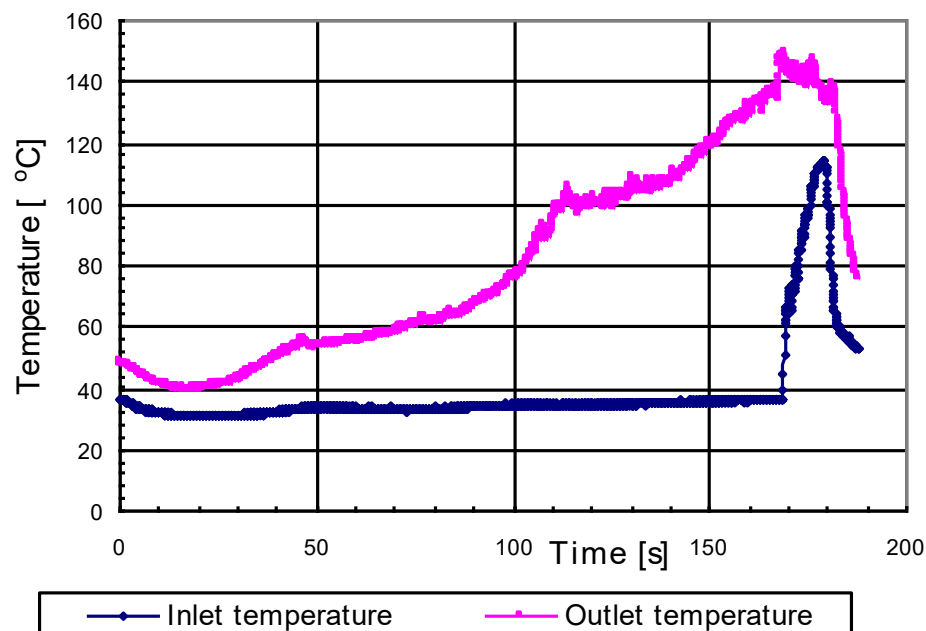
- Zarejestrowano przebieg faz kryzysu wrzenia
- Wyodrębniono nowe rodzaje przepływów w zbocznikowanym kanale pierścieniowym
- Zaobserwowano, że czas pomiędzy pojawieniem się pierwszych pęcherzyków pary a inicjacją kryzysu wrzenia wynosi ok. 1 s.
- Wielkość strumienia inicjującego wrzenie pęcherzykowe stanowi ok. 0,89 strumienia krytycznego.



Experiment C2



Experiment C2



Wykresy przebiegu parametrów ciepłno-przepływowych

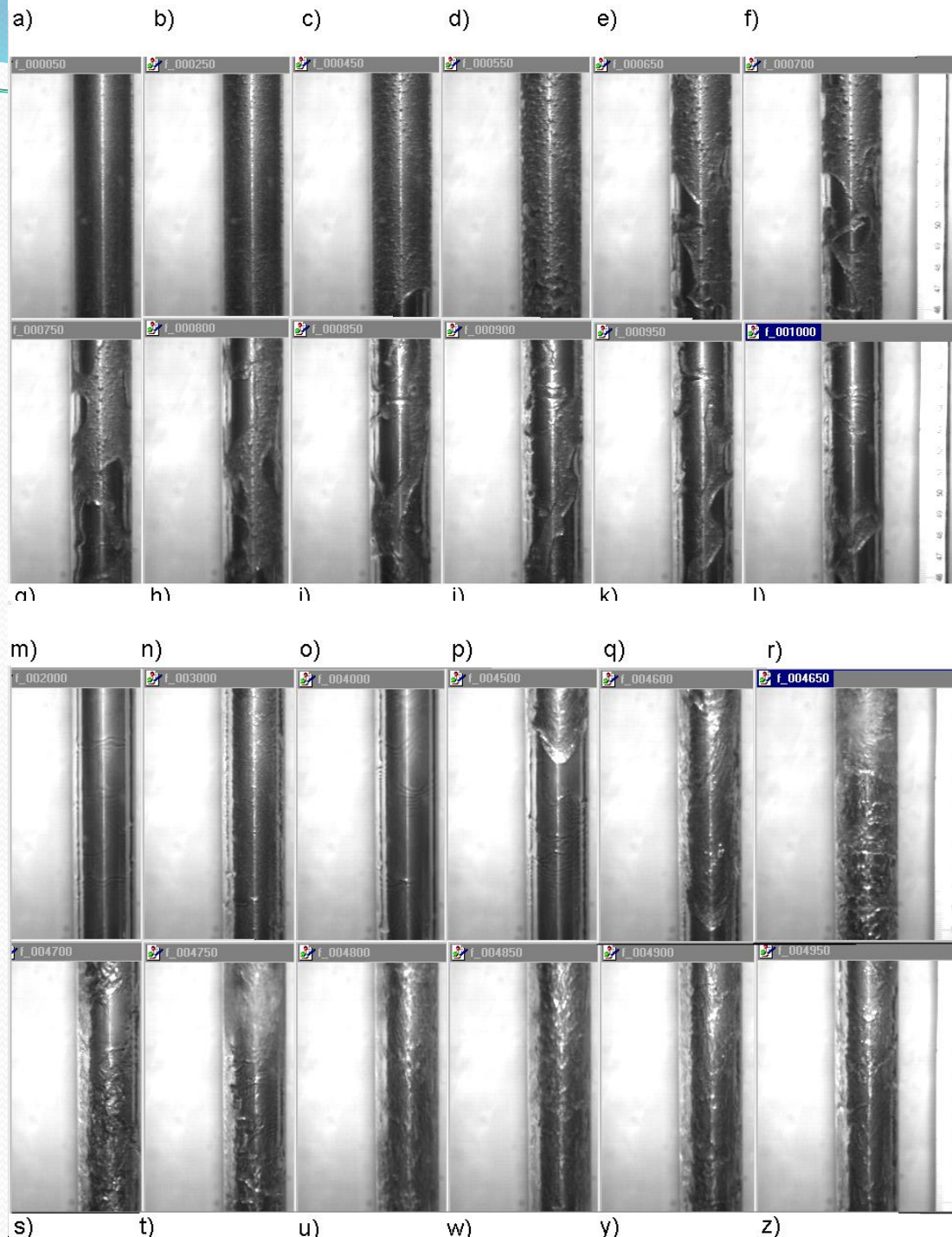


Ślady przepału na odcinku badawczym



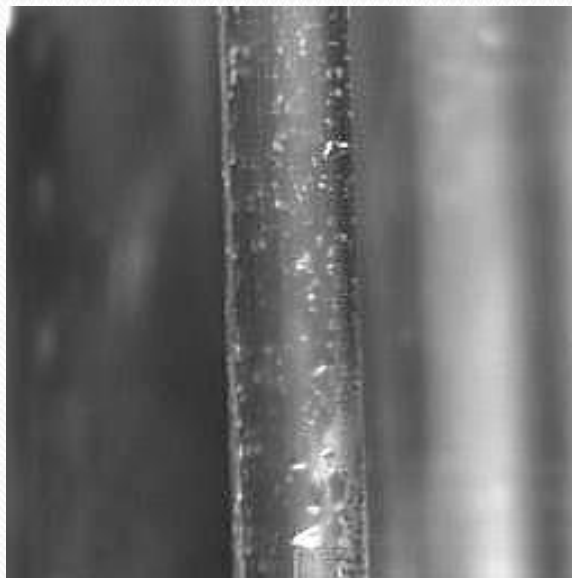
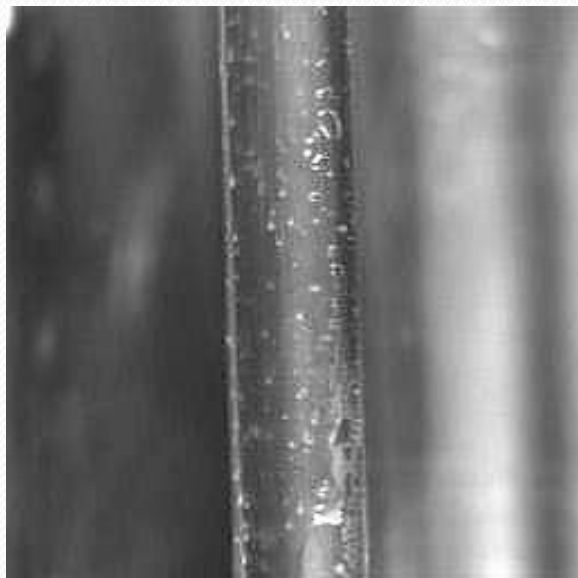
**Zdjęcia z 2,2s przebiegu
zjawiska poprzedzającego
kryzys wrzenia przy
prędkości przepływu
0,9 [m/s] (C2)**

- | | |
|-------------|-------------|
| a) 0,0222 s | b) 0,111 s |
| c) 0,2 s | d) 0,2444 s |
| e) 0,2888 s | f) 0,3111 s |
| g) 0,3333 s | h) 0,3555 s |
| i) 0,3777 s | j) 0,3999 s |
| k) 0,422 s | l) 0,444 s |
| m) 0,888 s | n) 1,333 s |
| o) 1,777 s | p) 2,0 s |
| q) 2,0444 s | r) 2,0666 s |
| s) 2,0888 s | t) 2,111 s |
| u) 2,1333 s | w) 2,1555 s |
| y) 2,1777 s | z) 2,2 s |

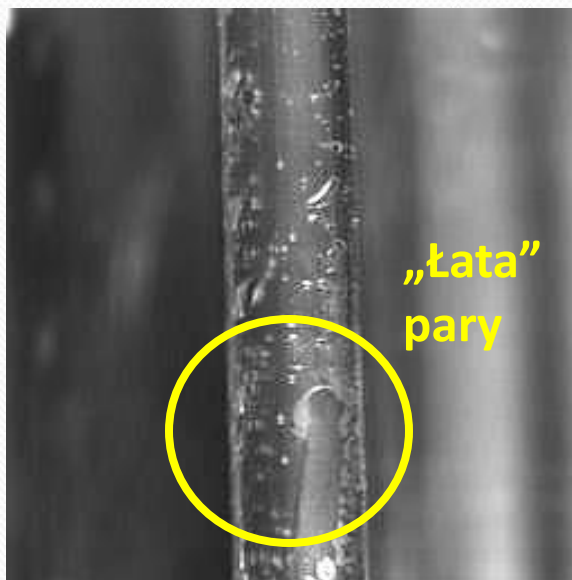
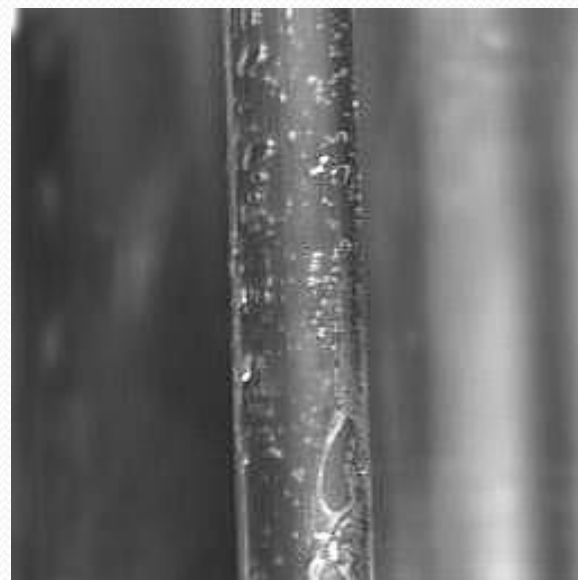




Zaobserwowane fazy kryzysu wrzenia



I faza – przepływ pęcherzykowy, tworzą się pęcherzyki, które poruszają zgodnie z kierunkiem przepływu.

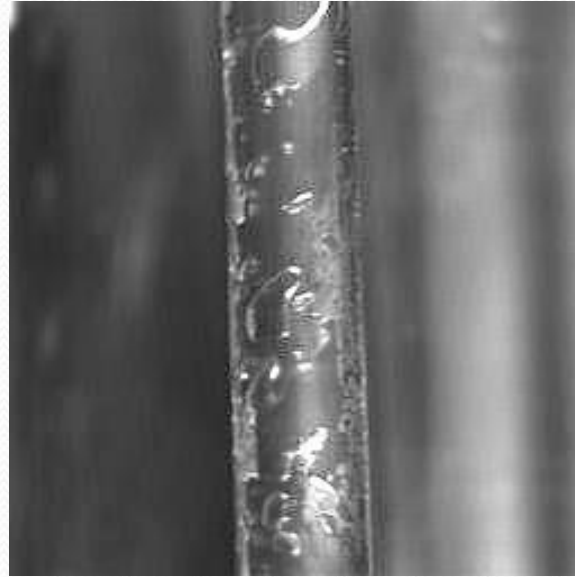
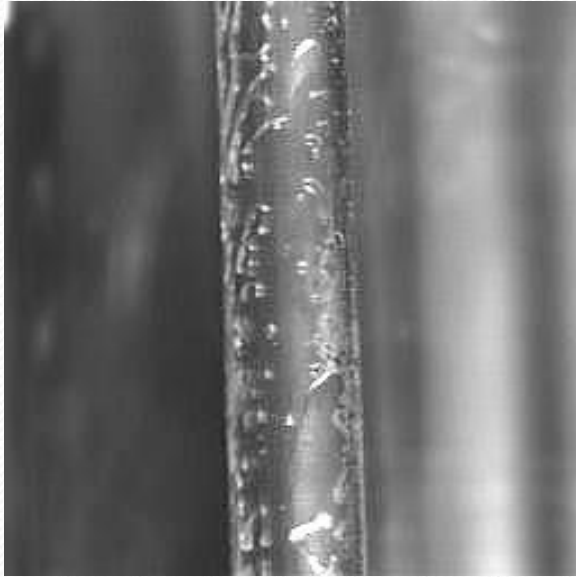


„łata”
pary

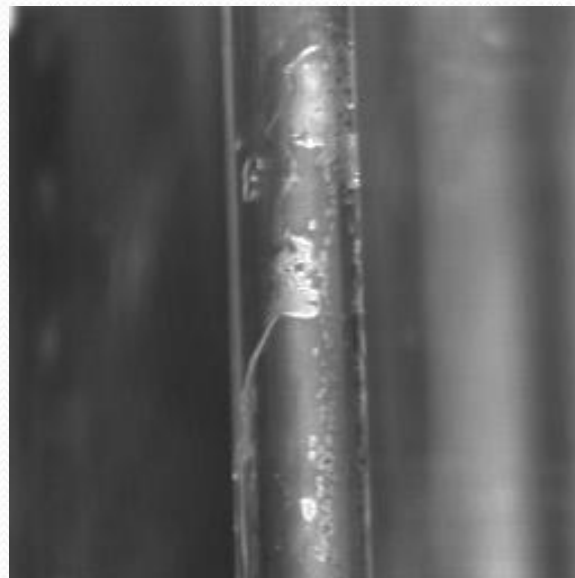
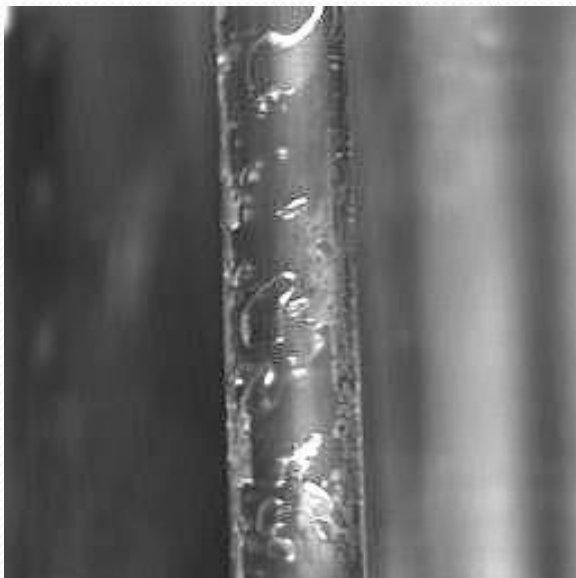
II faza– przepływ pęcherzykowo-korkowy, wyraźnie widoczne „łaty” pary



Zaobserwowane fazy kryzysu wrzenia



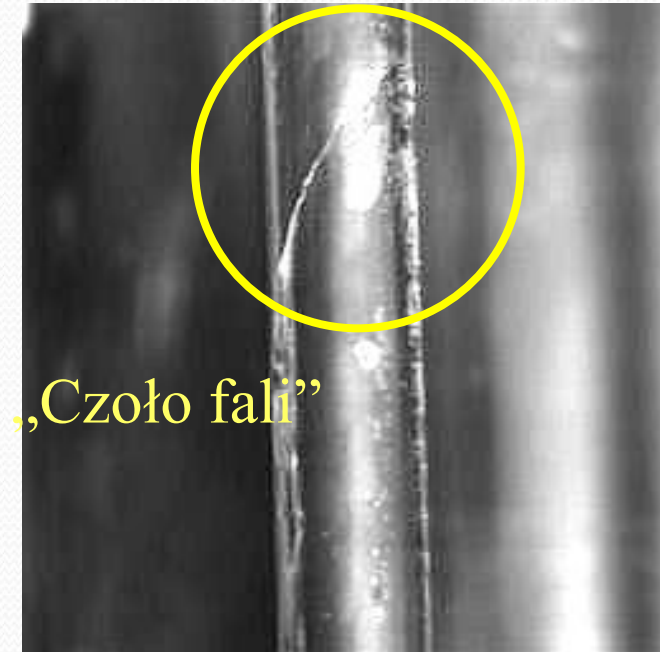
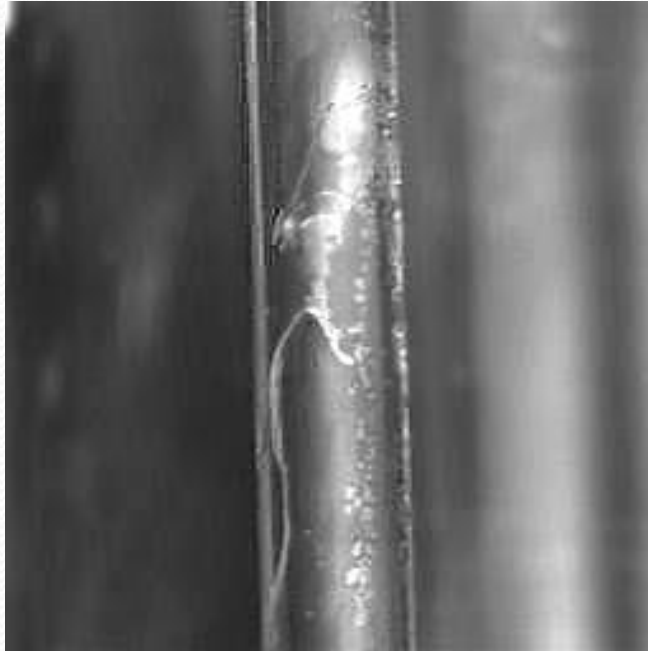
III faza - przepływ korkowy, coraz większe pęcherze pary unoszą się w kierunku przeciwnym do przepływu.



IV faza – przepływ korkowo-falowy początek kryzysu wrzenia, hamowanie przepływu, wyraźnie widoczne tworzące się korki pary i pojawiająca się błona parowa.



Zaobserwowane fazy kryzysu wrzenia

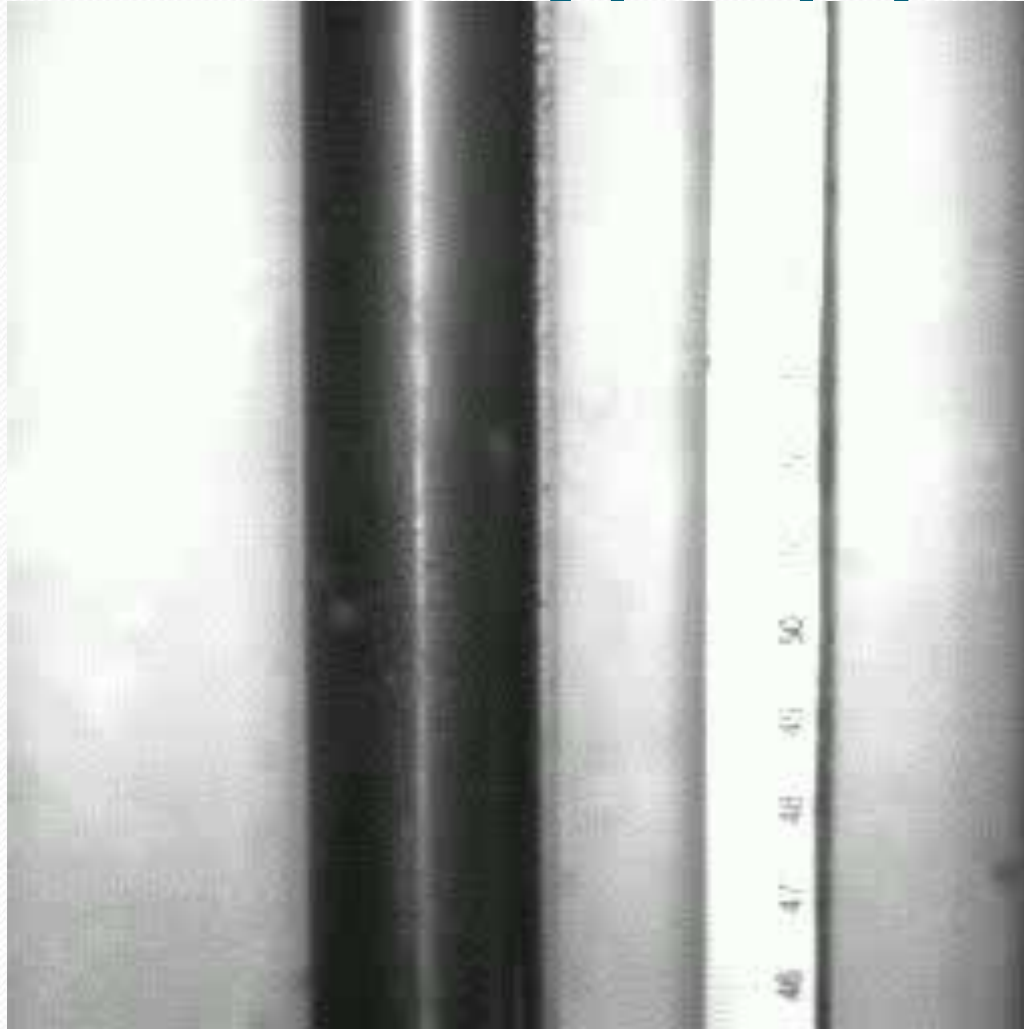


„Czoło fali”

V faza –Przepływ falowo-pierścieniowy -kryzys wrzenia –zahamowanie przepływu i osuszenie powierzchni z wyraźnie widoczną granicą pomiędzy fazami- „czołem fali”, które coraz szybciej porusza się w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu.



Film z wizualizacji przepływu(3,64 s)



$U=0.9$ m/s, $Re=4400$, $\Delta T_{sub}= 78^{\circ}C$, $CHF= 375$ kW



Stan aktualny WIW-300

- W ostatnich latach na hali C sporadycznie było wykorzystywane stanowisko POMPEA, służące do badań trwałościowych ciepłomierzy, prowadzonych dla GUM.
- Obecnie instalacja WIW-300 nie jest użytkowana.



Dziękuję za uwagę

