

## BADANIA PRZEJMOWANIA CIEPŁA PODCZAS WRZENIA NA PĘKU RUR OGRZEWANYCH ELEKTRYCZNIE

dr inż. Krzysztof Krasowski / ENERGA Kogeneracja sp. z o.o., Elbląg  
prof. dr hab. inż. Janusz T. Cieśliński / Politechnika Gdańska

### 1. WSTĘP

Proces wrzenia na pęku rur występuje w wielu aparatach przemysłowych, takich jak wyparki, warki czy parowniki zalane. Wrzenie pojawia się także w parownikach chłodziarek absorpcyjnych, wykorzystywanych w układach poligeneracyjnych, jednocześnie wytwarzających energię cieplną, elektryczną oraz dodatkowo chłód, otrzymywany dzięki chłodzarce (sprężarkowej bądź absorpcyjnej).

Dotychczasowe badania wrzenia na pęku rur wskazują, że charakterystyki cieplne poszczególnych rurek w pęku bardzo odbiegają od tych otrzymanych dla pojedynczej rurki, ze względu na silne oddziaływanie pęcherzyków parowych generowanych na niższych rzędach rurek. Poza tym stwierdzono duży wpływ geometrii układu pęku rur, w tym oddziaływania płaszcza wymiennika oraz hydrodynamiki przepływu na przekazywanie ciepła w pęku. Dotychczas niewiele jest danych dotyczących lokalnych, tj. odnoszących się do pojedynczych rurek w pęku, współczynników przejmowania ciepła.

Marto i Anderson [1] zastosowali w badaniach pęk 15 miedzianych rur, z których tylko 10 było ogrzewanych. Stosunek podziałki do średnicy rurki wynosił 1,2. Cieczą badaną był czynnik chłodniczy R113. Badania przeprowadzono przy ciśnieniu atmosferycznym. Badacze ustalili, że najniższy współczynnik przejmowania ciepła występował na dolnym rzędzie rur, które intensyfikowały przejmowanie ciepła na wyższych rzędach jedynie przy małych wartościach gęstości strumienia ciepła. Wartość współczynnika intensyfikacji pęku zależała od gęstości strumienia ciepła i liczby rur w pęku. Z badań wynika również, że największy wpływ na intensyfikację przejmowania ciepła na danej rurce ma rurka leżąca tuż pod nią. Zjawisko to ujmuje współczynnik wpływu pęku (*bundle effect* – [2]), który jest zdefiniowany jako stosunek współczynnika przejmowania ciepła dla najwyższej położonej rurki w pęku, przy ogrzewanych rurkach położonych poniżej, do współczynnika przejmowania ciepła dla tej samej rurki, lecz nieogrzewanych rurkach położonych poniżej.

Qiu i Liu [3] określali wpływ odstępu pomiędzy rurkami i ciśnienia na intensyfikację przekazywania ciepła w pęku 18 (3x6) polerowanych rurek z miedzi o średnicy 18 mm, ogrzewanych grzejnikami patronowymi. Układ rurek był przestawiony. Badacze stwierdzili, że dla podziałki 0,3 mm intensyfikacja przekazywania ciepła w pęku była najwyższa. Dla podziałki 0,3 mm położenie rurki w pęku nie miało znaczenia na rejestrowane współczynniki przejmowania ciepła. Dla podziałki większej niż 1 mm wpływ ciśnienia na przenoszony strumień ciepła był pomijalnie mały.

Gupta i in. [4] badali wrzenie wody przy ciśnieniu atmosferycznym na gładkich rurkach ze stali nierdzewnej o średnicy 19,05 mm, ogrzewanych elektrycznie. Rurki (dwie lub trzy) ułożone były jedna nad drugą przy stosunku podziałki ( $s$ ) do średnicy rurki ( $d$ ) wynoszącym od 1,5 do 6,0. Gęstość strumienia masy wody w stanie nasycenia dopływającej do zbiornika zmieniała się w granicach  $G = 0 \div 10 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . W ten sposób symulowano pracę zarówno parownika zalanego ( $G = 0$ ), jak i wyparki ( $G > 0$ ). Badacze ustalili, że współczynnik przejmowania ciepła na najniższej rurce nie zależał od obecności rurek powyżej. Poza tym najwyższy współczynnik przejmowania

### Streszczenie

*W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych wrzenia wody, metanolu i czynnika chłodniczego R141b na poziomym pęku rur gładkich, który w zamierzeniu ma reprezentować fragment parownika zalanego. Badania przeprowadzono dla pęku 19 rurek w układzie trójkątnym, dla dwóch stosunków podziałki do średnicy rurki, równych 1,7 oraz 2,0, w warunkach ciśnienia atmosferycznego i przy podciśnieniu. Wyznaczono zarówno*

*lokalne – w odniesieniu do pojedynczej rurki w pęku, jak i średnie (dla całego pęku rur) współczynniki przejmowania ciepła. Wizualizację wrzenia na pęku rur przeprowadzono za pomocą kamery CCD, przy zastosowaniu techniki laserowego noża świetlnego.*

*Przedstawiono propozycję równania korelacyjnego do obliczania średniego współczynnika przejmowania ciepła dla wrzenia na pęku rur gładkich.*



wania ciepła (o 100% wyższy niż dla najniższej rurki) otrzymano na najwyższej rurce w układzie trzech rurek i co ciekawe – dla wrzenia w dużej objętości ( $G = 0$ ).

Kumar i in. [5] badali wrzenie wody destylowanej w warunkach podciśnienia ( $35 \div 97,5$  kPa), na dwóch gładkich rurkach miedzianych o średnicy 32 mm, ułożonych jedna nad drugą, ogrzewanych grzejnikami patrowymi. Porównując otrzymane wyniki z wynikami innych autorów, nie zauważono istotnego wpływu materiału rurki na uzyskiwane współczynniki przejmowania ciepła.

Leong i Cornwell [6] testowali ogrzewany elektrycznie pęk składający się z 241 rur. Układ symulował parownik zalany. Badania przeprowadzone były z zastosowaniem czynnika R113, przy ciśnieniu atmosferycznym, dla rurek o średnicy zewnętrznej 19,05 mm i podziałki (w układzie kwadratowym) równej 25,4 mm. Współczynniki przejmowania ciepła na dole pęku okazały się być zbliżone do tych, jakie osiągnęły dla pojedynczej rurki, natomiast na górnych rzędach były znacznie wyższe.

Gupta [7] przeprowadził doświadczenia związane z wymianą ciepła dla wrzenia wody destylowanej, przy ciśnieniu atmosferycznym w pęku umieszczonym w zbiorniku o dużej objętości, składającym się z 15 rurek ( $3 \times 5$ ) w układzie liniowym, przy stosunku podziałki ( $s$ ) do średnicy rurki ( $d$ ) równym  $s/d = 1,5$ . Badania prowadzono dla zakresu gęstości strumienia ciepła  $10 \div 40$  kW/m<sup>2</sup>, przy gęstościach strumienia masy  $0 \div 10$  kg/m<sup>2</sup>s. Pęk wykonano z rurek ze stali nierdzewnej o średnicy 19,05 mm i długości efektywnej 190 mm. Rurki ogrzewano elektrycznie.

Wyniki Gupty wskazują na wyraźne różnice w osiągniętych współczynnikach przejmowania ciepła dla poszczególnych rzędów rur – od najniższej wartości dla rzędu dolnego do najwyższej wartości dla rzędu górnego. Wartość maksymalna współczynnika przejmowania ciepła dla rurki położonej najwyżej w kolumnie środkowej była siedmiokrotnie wyższa od współczynnika przejmowania ciepła dla rurki położonej najniżej w tym samym rzędzie, przy wrzeniu w objętości i tej samej gęstości strumienia ciepła wynoszącej 23 kW/m<sup>2</sup>. Podobną zależność współczynnika przejmowania ciepła uzyskał Gupta dla rurek w bocznych kolumnach, jednak wtedy wzrost wartości współczynnika przejmowania ciepła dla rurki najwyżej położonej w porównaniu z rurką w rzędzie najniższym nie przekraczał 300%.

Przepływy dwufazowe, zachodzące podczas wrzenia na pęku rur, zależą od wielu czynników, m.in. gęstości strumienia ciepła, właściwości cieczy, ciśnienia, rodzaju powierzchni rurki czy też sposobu rozmieszczenia rurek i podziałki. Niemniej jednak współczynnik przejmowania ciepła dla pęku rur ma zazwyczaj wartość wyższą niż dla pojedynczej rurki w tych samych warunkach. Zjawisko to ujmuje współczynnik intensyfikacji pęku (*bundle factor* – [2]), zdefiniowany jako stosunek średniego współczynnika przejmowania ciepła dla całego pęku do średniego współczynnika przejmowania ciepła dla pojedynczej rurki.

Webb i in. [8] podkreślają, że mechanizm przenoszenia ciepła w zalanych parownikach jest inny niż w wyparkach, co wynika z odmiennego układu rurek stosowanego w zalanych parownikach, który ogranicza konwekcję swobodną, a także z faktu, że na wlocie do parownika zalanego stopień suchości pary może wynosić nawet do 15%. Niezwykle trudne jest także wykorzystanie wyników badań przeprowadzonych z wykorzystaniem określonego pęku rur, rodzaju cieczy i warunków procesu dla innego przypadku. Próby teoretycznego opisu tego procesu i jego modelowania napotykają na wiele trudności. Do obliczeń wykorzystuje się zatem różnego rodzaju korelacje empiryczne bądź półempiryczne, w których występują wielkości stałe, wymagające eksperymentalnego wyznaczenia ich wartości.

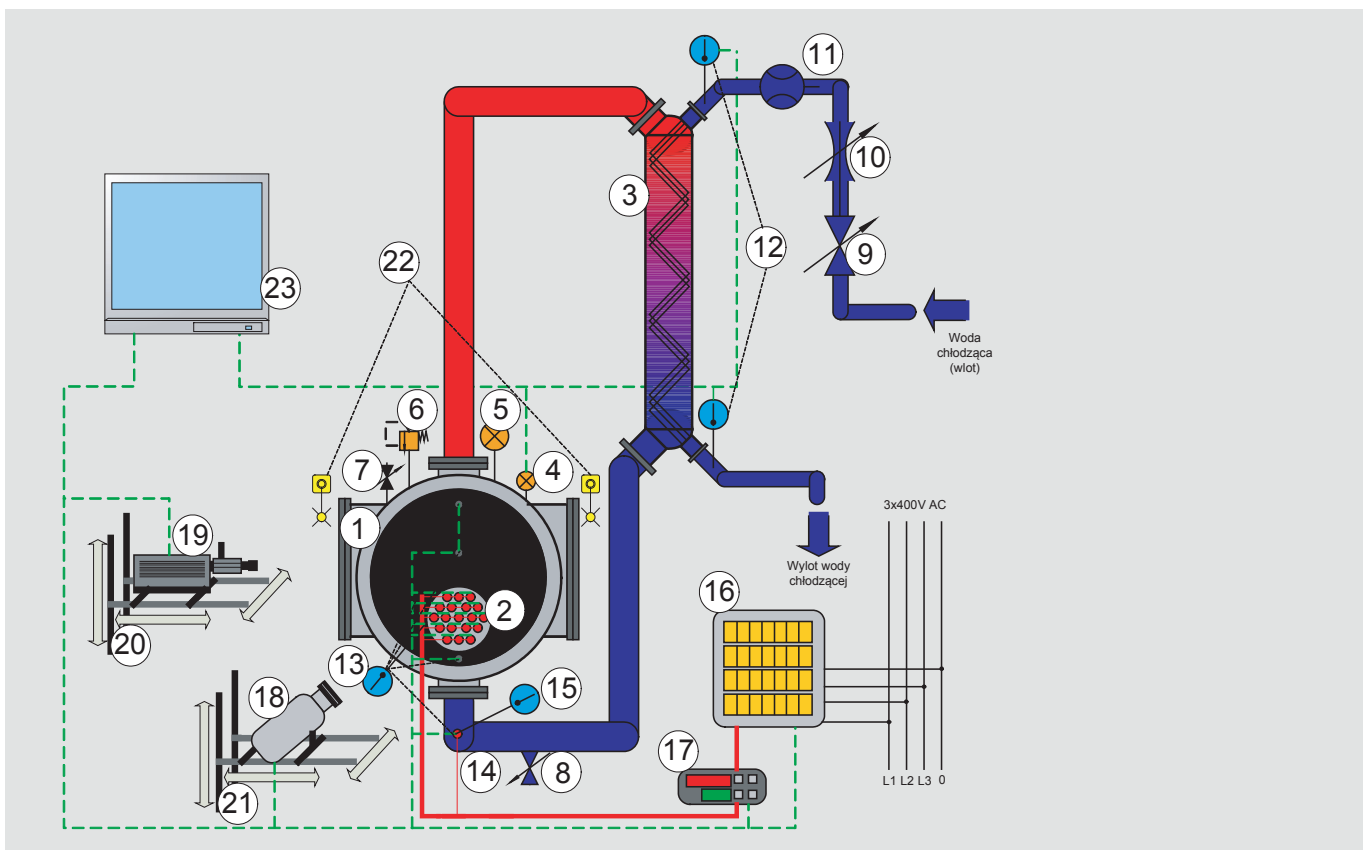
Zagadnieniem kluczowym w obliczaniu współczynnika przejmowania ciepła jest poprawne określenie temperatury zewnętrznej powierzchni rurki. Na pomiar ten, niezwykle trudny w realizacji, ma wpływ zarówno budowa samej sekcji grzejnej, jak i systemu zasilania i regulacji mocy oraz akwizycji danych pomiarowych. Z tego względu w pracy przedstawiono budowę układu pozwalającego na jednoczesny odczyt i archiwizację wyników pomiarów wrzenia na poziomym pęku rur, charakteryzującego się dużą dokładnością zarówno regulacji mocy, jak i pomiaru. Na podstawie danych eksperymentalnych, z których część przedstawiono w pracy, zaproponowano równanie korelacyjne w postaci zależności liczby Nusselta w funkcji liczby wrzenia, liczby Prandtla i parametrów geometrycznych pęku rur, do obliczania średniego współczynnika przejmowania ciepła dla wrzenia na pęku rur z powłoką porowatą.



## 2. STANOWISKO BADAWCZE

Stanowisko do badania wrzenia na pęku rur składa się z sześciu zasadniczych podsystemów: modelowego pęku rur, zbiornika pomiarowego, układu zasilania i regulacji mocy, układu chłodzenia, układu do akwizycji danych pomiarowych oraz układu do wizualizacji. Cylindryczny zbiornik pomiarowy, symulujący płaszcz rzeczywistego parownika, o średnicy 0,3 m oraz długości 0,3 m, wykonano ze stali nierdzewnej. Zbiornik jest zaopatrzony w trzy okna inspekcyjne – w ścianie czotowej (o średnicy płaszcza) i po bokach – o średnicy 200 mm w celu bezpośredniej obserwacji i wizualizacji procesu wrzenia. Instalacja obiegu cieczowo-parowego jest hermetyczna i pozwala na wykonywanie badań w zakresie ciśnień bezwzględnych od 3 do 300 kPa.

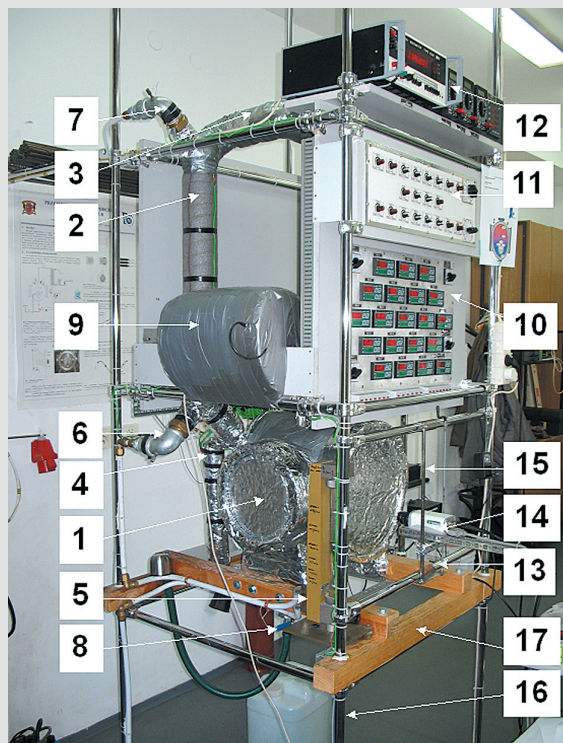
Pomiary dokonywane na tym stanowisku umożliwiają wyznaczenie średniego współczynnika przejmowania dla całego pęku rur, współczynnika przejmowania ciepła dla dowolnej pojedynczej rurki w pęku, obwodowego rozkładu temperatury dla każdej rurki, a także wizualizację struktur wrzenia na pęku rur. Schemat ideowy stanowiska zamieszczono na rys. 1, natomiast widok na rys. 2.



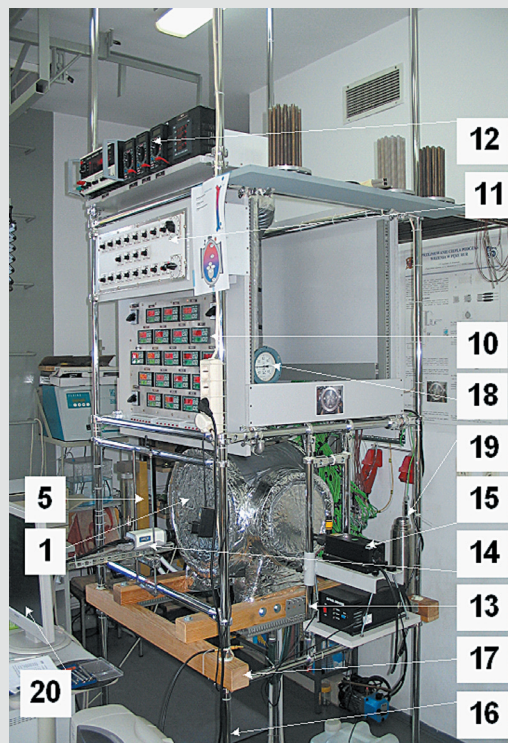
Rys. 1 Schemat stanowiska badawczego. 1 – zbiornik, 2 – pęk rur, 3 – skraplacz, 4 – przetwornik ciśnienia, 5 – wakuometr, 6 – zawór bezpieczeństwa, 7 – zawór regulacji ciśnienia w układzie, 8 – zawór spustowy gazu roboczego, 9 – zawór odcinający wodę chłodzącą, 10 – zawór regulacji przepływu, 11 – przepływomierz, 12 – czujniki temperatury wody chłodzącej, 13 – czujniki temperatury w zbiorniku i w pęku rur, 14 – grzejnik wstępny, 15 – czujnik temperatury grzejnika wstępnego, 16 – miernik mocy MPS, 17 – regulatory mocy, 18 – kamera CCD, 19 – laserowy nóż świetlny, 20 – ruchomy suport systemu laserowego noża świetlnego (3D), 21 – ruchomy suport kamery CCD (3D), 22 – oświetlenie dodatkowe, 23 – system akwizycji danych



a) widok od strony lewej



b) widok od strony prawej

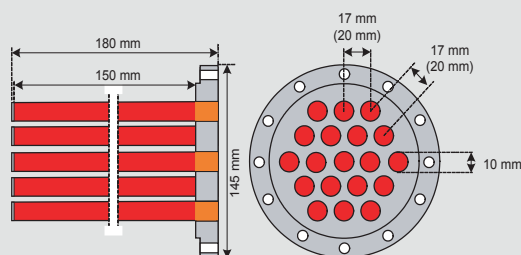


Rys. 2. Widok stanowiska badawczego. 1 – zbiornik badawczy, 2 – skraplacz, 3 – instalacja obiegu parowego, 4 – instalacja powrotu skroplin, 5 – rotometr (pomiar strumienia wody chłodzącej), 6 – przyłącze wlotu wody chłodzącej, 7 – przyłącze wylotu wody chłodzącej, 8 – zawór spustowy czynnika roboczego, 9 – multiplexer, 10 – panel regulatorów Reg1-Reg20 wraz z włącznikami zasilania, 11 – panel precyzyjnych regulatorów mocy RPG1-RPG20 wraz z przełącznikami pomiaru spadku napięcia  $\Delta U$ , 12 – panel woltomierzy V1-V4 wraz z miernikiem parametrów sieci MPS, 13 – ruchomy suport (kamery CCD), 14 – kamera CCD, 15 – laserowy nóż świetlny, 16 – konstrukcja rurowa ramy stanowiska badawczego, 17 – belki mocowania zbiornika, 18 – wakuometr, 19 – zero lodowe, 20 – komputer systemu akwizycji danych

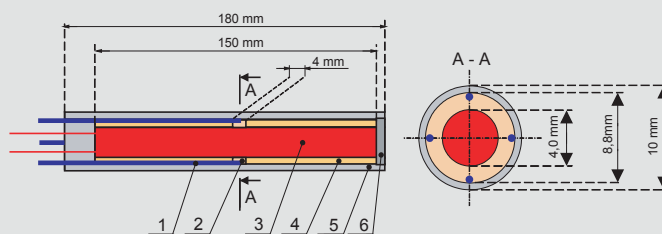
Eksperymentalny pęk składał się z 19 rur w układzie trójkątnym o stosunku podziałki do średnicy rurki wynoszącym 1,7 oraz 2,0 (rys. 3a). Rurki były z jednej strony zamocowane w dnie sitowym ze stali nierdzewnej, a drugi swobodny koniec umożliwiał czołową obserwację wrzenia w pęku. Długość czynna rurek wynosiła 150 mm.

W wyniku wielu prób wykonanych w trakcie budowy i wzorcowania sekcji grzejnej, a także studiów literaturowych, ustalono, że zrealizowana zostanie koncepcja przedstawiona na rys. 3b, polegająca na zastosowaniu pomiędzy grzejnikiem patronowym a wewnętrzną powierzchnią rurki dwóch tulejek miedzianych, rozdzielonych pierścieniem bakelitowym o szerokości 4 mm. Termoelementy były ułożone w rowkach (0,55 x 0,55 mm) wyżłobionych (metodą elektrodrążenia) w tulejkach, a końcówki termoelementów były zamocowane w zagłębieniach wykonanych w pierścieniu ebonitowym. Do pomiaru temperatury wykorzystano termoelementy typu K o średnicy płaszczka 0,5 mm. Grzejniki patronowe, wykonane na specjalne zamówienie, miały średnicę zewnętrzną 4 mm, efektywną długość grzejną 150 mm oraz maksymalną moc  $P_{maks} = 300$  W.

a) schemat pęku rur



b) schemat pojedynczej rurki



Rys. 3. Schemat modelowego pęku rur. 1 – termoelement, 2 – pierścień ebonitowy, 3 – grzejnik patronowy, 4 – tuleja miedziana, 5 – badana rurka, 6 – zaślepka

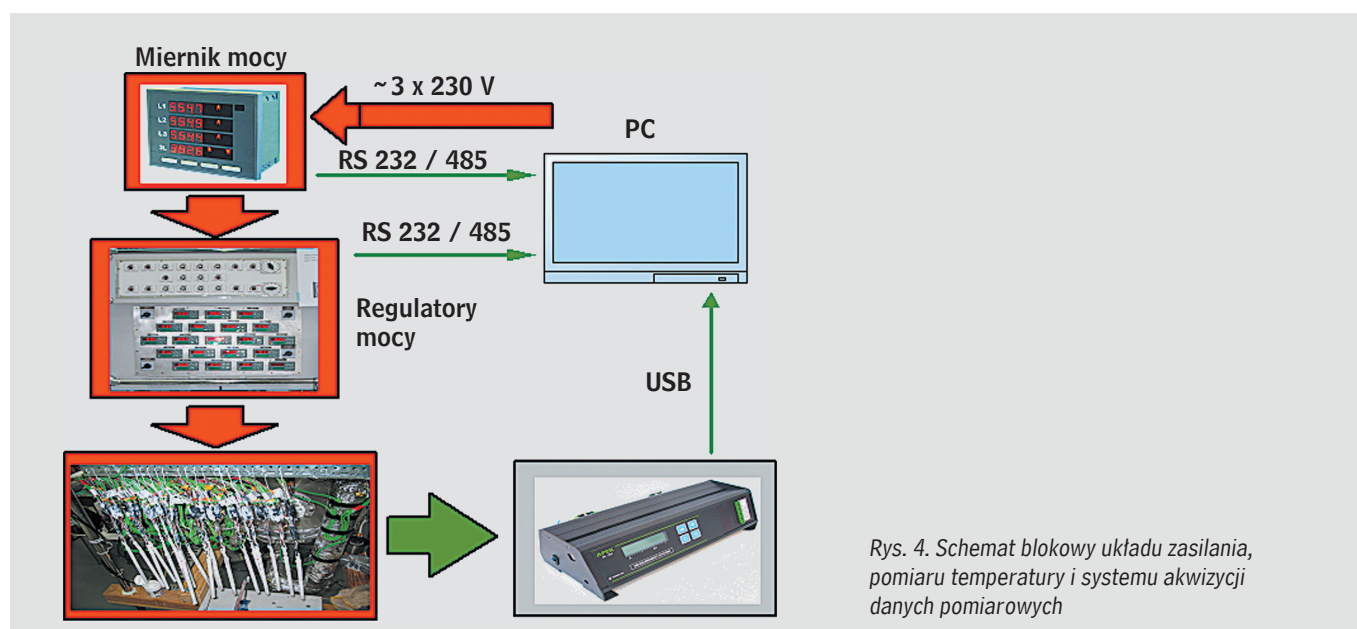
Wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła dla poszczególnych rur w pęku wymaga indywidualnego określenia doprowadzanej mocy elektrycznej, która była mierzona za pomocą miernika mocy N13 – MPS – cyfrowego przyrządu programowalnego przeznaczonego do pomiaru parametrów sieci energetycznych trójfazowych w układach symetrycznych i niesymetrycznych z jednoczesnym wyświetlaniem mierzonych wielkości, cyfrową transmisją ich wartości i przetwarzaniem na standardowy sygnał analogowy. Wskazania mocy uwzględniały wartości zaprogramowanych przekładni. Wartość każdej z mierzonych wielkości przesyłana była do systemu nadrzędnego interfejsem RS-485, a dalej, za pośrednictwem konwertera, interfejsem RS-232 do komputera klasy PC. Z ekranu komputera, poprzez łącze szeregowo, możliwa była obsługa miernika za pomocą dedykowanego programu (WizPar).

Do pracy na stanowisku badawczym dobrano miernik o zakresie prądów wejściowych  $-I_n = 5A$ , fazowych napięciach wejściowych  $-U_n = 3 \times 230 V$ , z programowalnym analogowym wyjściem prądowym  $-20...+20 mA$  z interfejsem RS-485, w wykonaniu standardowym z atestami kontroli jakości.

Płynną regulację mocy każdej z grzałek umożliwiały precyzyjne regulatory mocy RPG1-RPG20 oparte na układzie tyrystorowym. Ponadto w układzie zastosowano regulatory Reg1-Reg20, które zabezpieczały grzejniki patronowe przed nadmiernym wzrostem ich temperatury lub też przed nadmiernym wzrostem temperatury w instalacji obiegu czynnika roboczego. Każdy z regulatorów Reg1-Reg20 połączono z jednym z termoelementów umieszczonych przy zasilanej za jego pośrednictwem grzałce. W regulatorach ustawiono temperatury włączenia, wyłączenia oraz alarmu. Dzięki wyposażeniu ich w dwa wyświetlacze, pokazujące wartość zadaną i mierzoną, pełniły one również rolę wskaźników temperatury. Wszystkie regulatory Reg1-Reg20 podłączono, podobnie jak miernik parametrów sieci (MPS), do komputera klasy PC poprzez konwerter i złącze RS 232. Umożliwiało to podgląd ich pracy, zmianę parametrów czy też wizualizację rozkładu temperatury w czasie na wybranej grzałce. W przypadku miernika parametrów sieci możliwe było wygenerowanie wykresów obrazujących m.in. rozkład obciążenia poszczególnych faz w czasie czy wartości napięć na kolejnych fazach.

Przesyłanie do komputera mierzonych wartości chwilowych temperatur oraz ciśnienia z wybraną częstością zrealizowano dzięki zastosowaniu multipleksera AL154RX02. Urządzenie to wykonano specjalnie do celów pomiarowych realizowanych na stanowisku badawczym. Zawiera ono 127 wejść pomiarowych na termoelementy typu K, wejście pomiaru ciśnienia ( $-0,1 MPa \div 0,6 MPa$ ) poprzez wykonany na zamówienie czujnik ciśnienia AR26 (maks. błąd pomiaru  $-0,1\%$  wartości mierzonej). Błąd pomiaru temperatury wynosił  $\pm 0,05 K$ , zaś czas próbkowania ustawiono na 0,5 s. Dane przesyłane były do komputera interfejsem komunikacyjnym USB, a programowanie konfiguracji wykonywano za pomocą dedykowanego programu komputerowego APEK Multiplekser. Program ten umożliwiał wybór liczby kanałów pomiarowych, programowanie charakterystyk wejściowych i kalibrację, wizualizację wszystkich kanałów na wykresach słupkowych, wizualizację wybranych kanałów na wykresie, ustawianie częstości próbkowania, ograniczanie czasu pomiaru oraz przenoszenie plików bezpośrednio do Microsoft Excel.

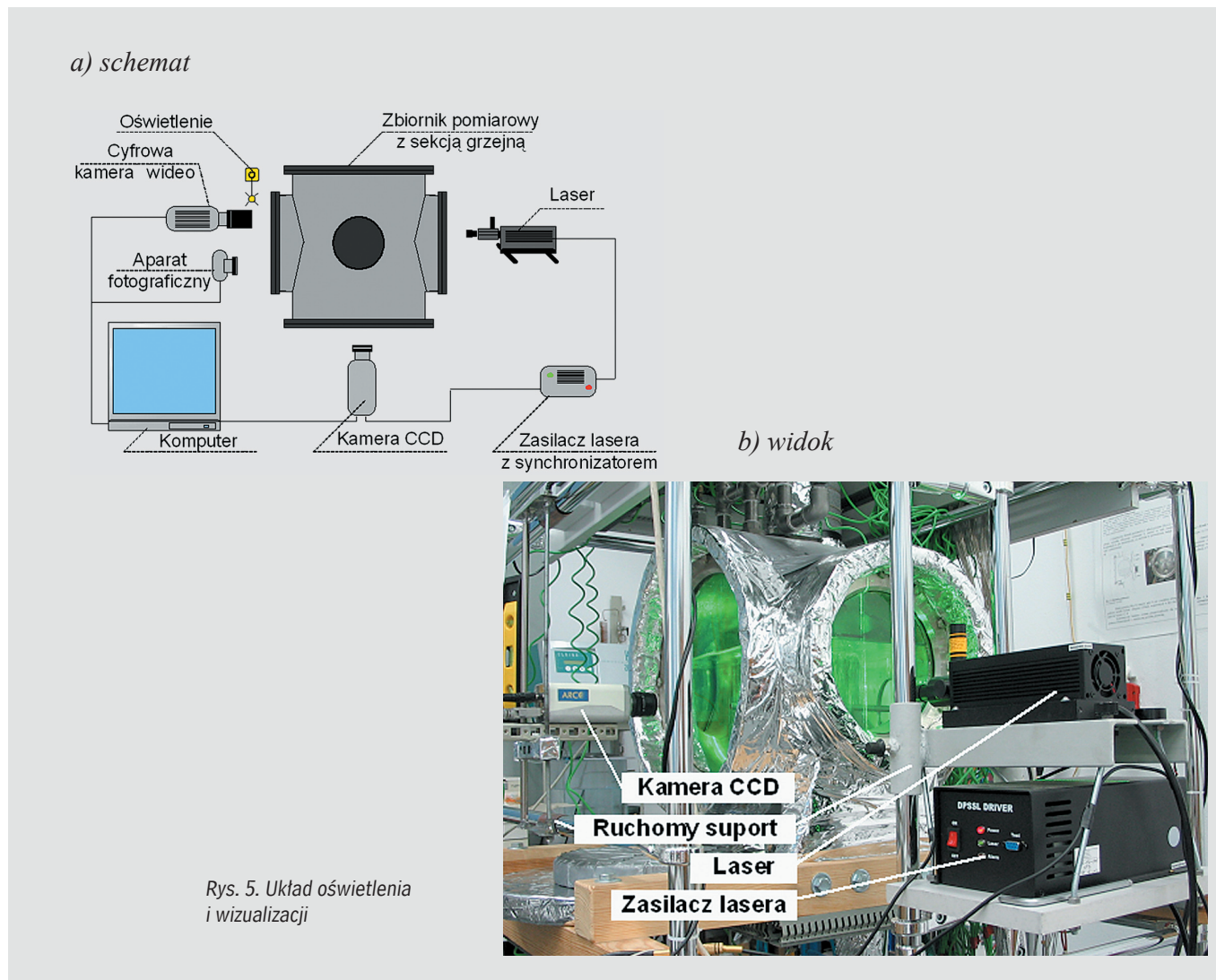
Schemat blokowy opisanego układu zasilania, sprzęgniętego z układem pomiaru temperatury i systemem akwizycji danych, przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Schemat blokowy układu zasilania, pomiaru temperatury i systemu akwizycji danych pomiarowych



Oświetlenie pęku rur zrealizowano, opierając się na systemie laserowym noża świetlnego o mocy 1500 mW (532 nm, 10 kHz, multimode) z optyką *light sheet*, ustawionego prostopadle do badanych rur. W ich osi umieszczono kamerę CCD opartą na sensorze TC 237 firmy Texas, którą wykonywano zdjęcia procesu wrzenia (szybkość do 15 000 klatek na sekundę). Schemat rozmieszczenia i połączeń układu do wizualizacji oraz widok części stanowiska badawczego z układem wizualizacji przedstawiono na rys. 5.



Dzięki zastosowaniu układu synchronizacji pracy kamery CCD i lasera możliwe było sterowanie włączeniem oświetlenia (lub błyskiem) laserowego noża świetlnego w momencie wyzwolenia kamery, jak również regulacja długości oświetlania.

Na stanowisku zastosowano również ruchome suporty, zarówno w mocowaniu kamery do szybkich zdjęć, jak i układu laserowego, dzięki czemu możliwa była zmiana położenia oświetlenia laserowego i miejsca nagrywania w dwóch płaszczyznach – poziomej i pionowej.

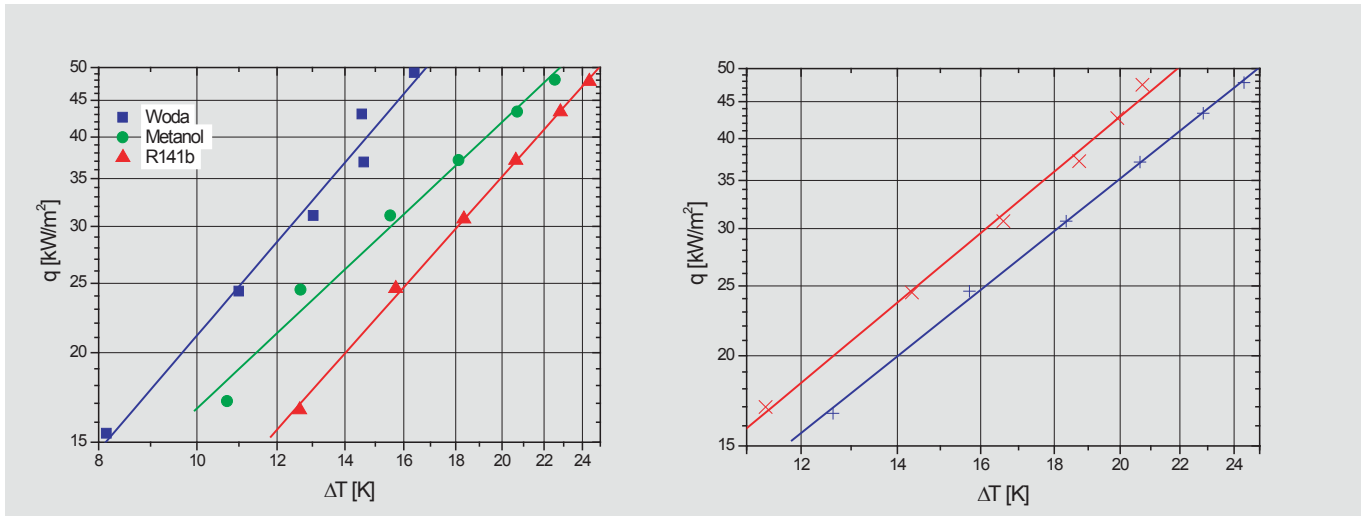
Układ oświetlenia laserowego wyposażono również w specjalną regulację optyki, umożliwiającą zmianę geometrii noża świetlnego (pion – poziom, szerokość wiązki).

Szczegółowy opis stanowiska badawczego i procedury pomiarowej jest zamieszczony w [9].

### 3. WYNIKI BADAŃ

Z przeprowadzonych badań wynika, że niezależnie od podziałki i ciśnienia najwyższe współczynniki przejmowania ciepła osiągnięto dla wody, co wynika z jej doskonałych właściwości termofizycznych, przede wszystkim dużego ciepła parowania. Przykładowo na rys. 6 zaprezentowano krzywą wrzenia na pęku rur gładkich o stosunku  $s/d = 1,7$ , przy ciśnieniu atmosferycznym.

Dla wszystkich badanych cieczy, zarówno w ciśnieniu atmosferycznym, jak i podciśnieniu, wyższe współczynniki przejmowania ciepła osiągnięto dla większej z badanych podziałek, tj. dla  $s/d = 2,0$ . Przykładowo na rys. 7 przedstawiono krzywą wrzenia dla czynnika R141b przy ciśnieniu atmosferycznym.

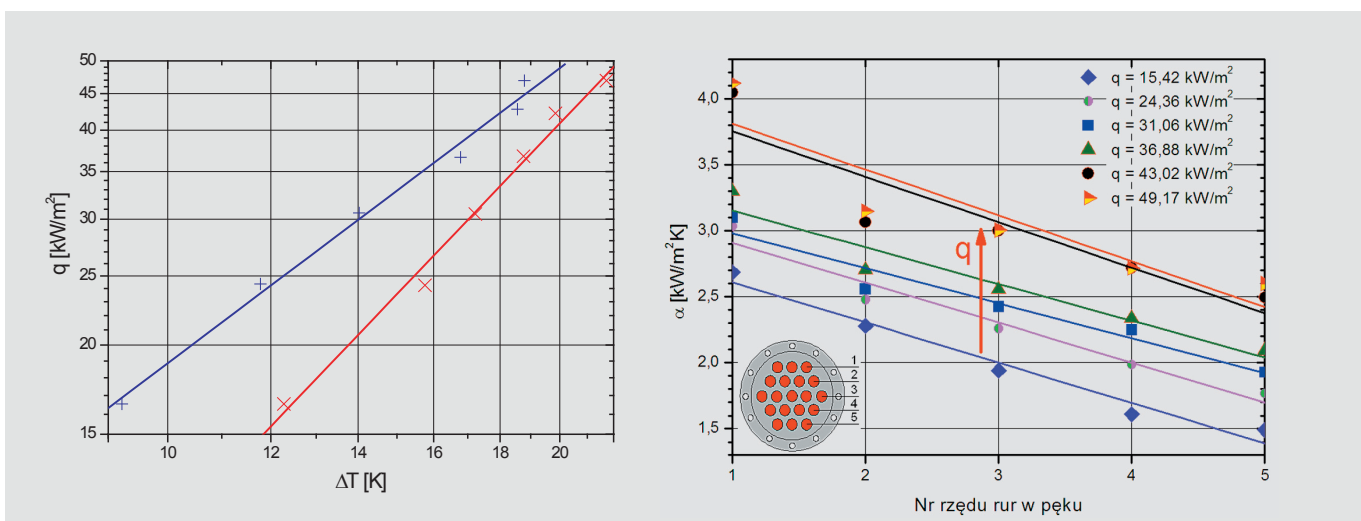


Rys. 6. Wpływ rodzaju cieczy wrzącej na przebieg krzywej wrzenia przy ciśnieniu atmosferycznym ( $p = 101,2 \text{ kPa}$ ), na pęku rur o  $s/d = 1,7$

Rys. 7. Wpływ podziałki na przebieg krzywej wrzenia czynnika R141b na pęku rur gładkich przy ciśnieniu atmosferycznym ( $p = 101,2 \text{ kPa}$ );  $s/d$ : + - 1,7, × - 2,0

Niezależnie od rodzaju wrzącej cieczy i podziałki, wyższe współczynniki przejmowania ciepła osiągnięto w ciśnieniu atmosferycznym, co jest zgodne z nielicznymi opublikowanymi danymi eksperymentalnymi. Przykładowo na rys. 8 przedstawiono krzywą wrzenia dla metanolu, przy wrzeniu na pęku rur z powłoką porowatą dla  $s/d = 2,0$ .

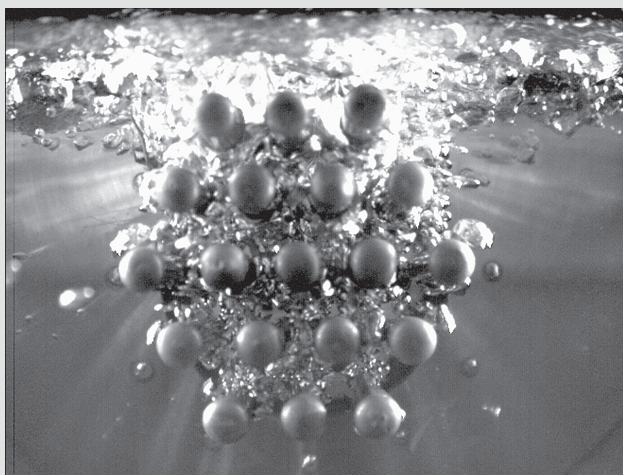
Na rys. 9 przedstawiono zależność średniego współczynnika przejmowania ciepła dla danego rzędu rur i badanych gęstości strumienia ciepła w przypadku wrzenia wody na pęku rurek gładkich o  $s/d = 1,7$ , przy ciśnieniu atmosferycznym. Im wyżej był położony rząd rurek, tym wyższa była wartość współczynnika przejmowania ciepła, która rosła także wraz ze wzrostem gęstości strumienia ciepła. Taki rozkład współczynnika przejmowania ciepła można wytłumaczyć intensyfikującym oddziaływaniem pęcherzyków pary generowanych na niższych rzędach rurek. Wizualizację tego zjawiska przedstawiono na rys. 10.



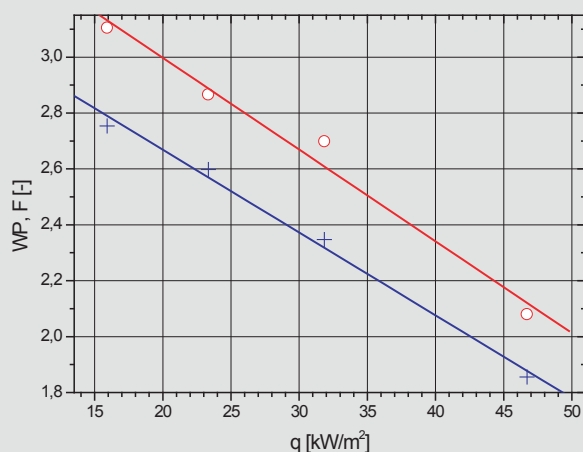
Rys. 8. Wpływ ciśnienia na przebieg krzywej wrzenia metanolu na pęku rur z powłoką porowatą dla  $s/d = 2,0$   
+ - ciśnienie atmosferyczne ( $p = 101,1 \text{ kPa}$ )  
× - podciśnienie ( $p = 19,5 \text{ kPa}$ )

Rys. 9. Zależność śr. wsp. przejm. ciepła dla poszczególnych gęst. str. ciepła w funkcji rzędu rur w przypadku wrzenia wody na pęku rurek o  $s/d = 1,7$ , przy ciśnieniu atmosferycznym ( $p = 100,5 \text{ kPa}$ )

Na rys. 11 pokazano przebieg współczynnika intensyfikacji pęku ( $F$ ) i dodatkowo współczynnika wpływu pęku ( $WP$ ) dla wrzenia metanolu na pęku rur o  $s/d = 2,0$ , przy ciśnieniu atmosferycznym. Zgodnie z danymi literaturowymi współczynnik wpływu pęku jest nieco wyższy od współczynnika intensyfikacji pęku, a ich wartość zmniejsza się wraz ze wzrostem gęstości strumienia ciepła.

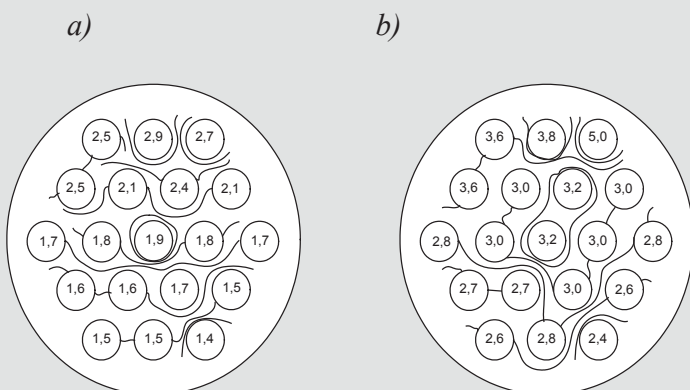


Rys. 10. Wizualizacja intensyfikującego oddziaływania pęcherzyków pary dla wrzenia wody na pęku rur o  $s/d = 1,7$ , przy ciśnieniu atmosferycznym ( $p = 100,5 \text{ kPa}$ ) i gęstości strumienia ciepła  $q = 30,25 \text{ kW/m}^2$



Rys. 11. Współczynnik intensyfikacji pęku ( $F - +$ ) i współczynnik wpływu pęku ( $WP - \circ$ ) przy wrzeniu czynnika R141b na pęku rur gładkich o  $s/d = 2,0$  i podciśnieniu

Wyposażenie każdej rurki w pęku w grzejnik umożliwia wyznaczenie rozkładów współczynnika przejmowania ciepła w pęku. Przykładowo na rys. 12 pokazano orientacyjny przebieg linii stałego współczynnika przejmowania ciepła przy wrzeniu wody w pęku rur gładkich, przy ciśnieniu atmosferycznym, dla minimalnej i maksymalnej badanej gęstości strumienia ciepła. Liczby w kółkach oznaczają średnie wartości współczynnika przejmowania ciepła dla danej rurki. Współczynniki przejmowania ciepła na dole obu pęków były prawie dwukrotnie niższe od tych w najwyższych rzędach, a poza tym w kolumnie środkowej mają nieco wyższe wartości aniżeli po bokach.



Rys. 12. Linie stałego współczynnika przejmowania ciepła dla wrzenia wody na pęku rur gładkich o  $s/d = 1,7$   
 a)  $q = 15,42 \text{ kW/m}^2$ ,  
 b)  $q = 49,17 \text{ kW/m}^2$ ;  
 dane w  $[\text{kW/m}^2\text{K}]$

W wyniku zastosowania wielowymiarowej analizy regresji, dla wrzenia wody, metanolu i czynnika chłodniczego R141b, w warunkach podciśnienia i przy ciśnieniu atmosferycznym opracowano równanie korelacyjne (1) do obliczania średniego współczynnika przejmowania ciepła dla pęków rur gładkich.

$$Nu = 521,7 \times Bo^{0,305} \times \left( \left( \ln \frac{p}{p_{kr}} \right)^2 \right)^{-1,48} \times \left( \frac{s}{D} \right)^{0,74} \times Pr^{0,67} \quad (1)$$



gdzie: liczba Nusselta  $Nu = \frac{\bar{\alpha} \times d}{\lambda_l}$ , liczba wrzenia  $Bo = \frac{q \times L \times \rho_l}{\rho_v \times r \times \mu_l}$ , liczba Prandtla  $Pr = \frac{v}{a}$ , wymiar charakterystyczny  $L = \sqrt{\frac{\sigma}{g \times (\rho_l - \rho_v)}}$

$a$  – dyfuzyjność cieplna,  $m^2/s$

$d$  – średnica,  $m$

$g$  – przyspieszenie ziemskie,  $m/s^2$

$p$  – ciśnienie,  $N/m^2$

$q$  – gęstość strumienia ciepła,  $W/m^2$

$r$  – ciepło parowania,  $J/kg$

$s$  – podziałka,  $m$

$\alpha$  – średni współczynnik przejmowania ciepła,  $W/m^2K$

$\lambda$  – współczynnik przewodzenia ciepła,  $W/mK$

$\rho$  – gęstość,  $kg/m^3$

$\mu$  – dynamiczny współczynnik lepkości,  $Ns/m^2$

$\sigma$  – napięcie powierzchniowe,  $N/m$

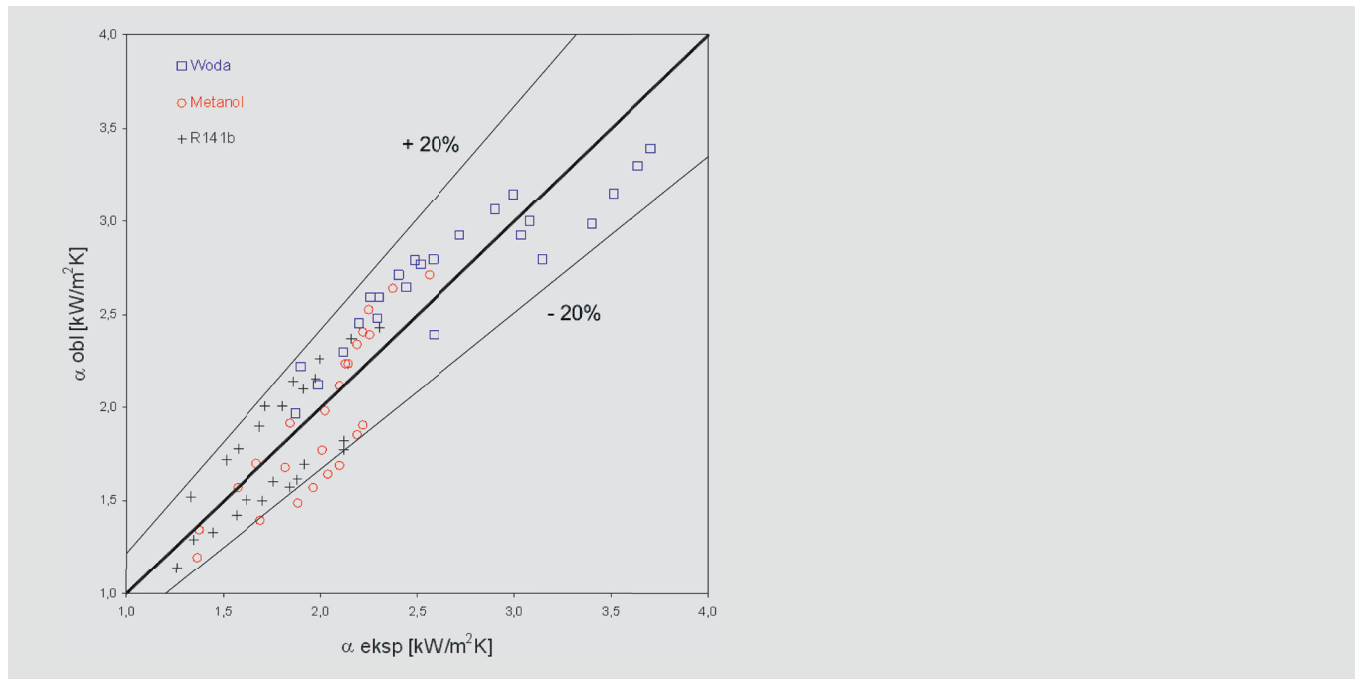
$\nu$  – kinetyczny współczynnik lepkości,  $m^2/s$

$kr$  – krytyczne

$l$  – ciecz

$v$  – para

Z porównania średniego współczynnika przejmowania ciepła otrzymanego z badań eksperymentalnych ze współczynnikiem przejmowania ciepła wyznaczonym za pomocą zaproponowanej korelacji wynika, że jedynie 4 punkty na 72 nie mieszczą się w zakresie  $\pm 20\%$  (rys. 13).



Rys. 13. Zestawienie danych eksperymentalnych z wynikami obliczeń dla wrzenia wody, metanolu i czynnika R141b na pęku rurek gładkich, przy ciśnieniu atmosferycznym oraz w warunkach podciśnienia



#### 4. PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych systematycznych badań eksperymentalnych wrzenia wody, metanolu i czynnika chłodniczego R141b na pękach rur gładkich wynika, że:

- niezależnie od podziałki i ciśnienia najwyższe współczynniki przejmowania ciepła osiągnięto dla wody
- niezależnie od ciśnienia i rodzaju wrzącej cieczy wyższe współczynniki przejmowania ciepła osiągnięto dla większej z badanych podziałek, tj.  $s/d = 2,0$
- niezależnie od rodzaju wrzącej cieczy i podziałki wyższe współczynniki przejmowania ciepła osiągnięto dla ciśnienia atmosferycznego
- zaproponowane równanie korelacyjne dla wrzenia wody, metanolu i czynnika R141b dobrze odwzorowuje własne wyniki doświadczalne.

#### BIBLIOGRAFIA

1. Marto P.J., Anderson C.L., Nucleate boiling characteristics of R-113 in small tube bundle. *ASME J. Heat Transfer*, vol. 114, s. 425–433, 1992.
2. Memory S.B., Chilman S.V., Marto P.J., Nucleate pool boiling of TURBO-B bundle in R-113. *ASME J. Heat Transfer*, vol. 116, s. 670–678, 1994.
3. Qiu Y.H., Liu Z.H.: Boiling heat transfer of water on smooth tubes in a compact staggered tube bundle. *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, s. 1431–1441, 2004.
4. Gupta A., Saini J.S., Varma H.K., Boiling heat transfer in small horizontal tube bundles at low cross-flow velocities. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 38, nr 4, s. 599–605, 1995.
5. Kumar S., Mohanty B., Gupta S.C., Boiling heat transfer from vertical row of horizontal tubes. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45, s. 3857–3864, 2002.
6. Leong L.S., Cornwell K., Heat transfer coefficients in a reboiler tube bundle. *The Chemical Engineer*, 343, s. 219–221, 1979.
7. Gupta A., Enhancement of boiling heat transfer in a 3x5 tube bundle. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48, s. 3763–3772, 2005.
8. Webb R.L., Choi K.D., Apparao T.R., A theoretical model for prediction of the heat load in flooded refrigerant evaporator. *ASHRAE Trans.*, vol. 95, Pt. 1, 326–338, 1989.
9. Krasowski K., Przejmowanie ciepła przy wrzeniu na poziomym pęku rur z powłoką porowatą. Rozprawa doktorska, WM PG, 2009.

