

Tadeusz BOHDAL

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, KATEDRA TECHNIKI CIEPLNEJ I CHŁODNICTWA

Badanie przemieszczania się zaburzeń w skraplającym się czynniku chłodniczym

Prof. dr hab. inż. Tadeusz BOHDAL

Absolwent Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Koszalinie. Stopień naukowy doktora i doktora habilitowanego uzyskał w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn, specjalność technika cieplna i chłodnicza. Tytuł profesora uzyskał w 2007 roku w zakresie nauk technicznych. Jest kierownikiem Katedry Techniki Ciepłej i Chłodnictwa na Wydziale Mechanicznym. Główne zainteresowania naukowe to wymiana ciepła i pędu podczas przemian fazowych czynników chłodniczych oraz niestabilności im towarzyszące.



e-mail: tadeusz.bohdal@tu.koszalin.pl

Streszczenie

Przeprowadzono badania eksperymentalne przemieszczania się zaburzeń w skraplającym się czynniku chłodniczym R404A. Podczas badań na stanowisku pomiarowym w skraplaczu chłodzonym powietrzem wywołano skokową zmianę ciśnienia. Wzrost ciśnienia w kanale rurowym skraplacza powodował rozwój skraplania czynnika chłodniczego a spadek ciśnienia jego zanik. Stwierdzono, że zjawisko ma charakter falowy. Wprowadzone zaburzenie przemieszczało się ze skończoną prędkością zależną od parametrów ośrodka dwufazowego w postaci fali ciśnieniowej i temperaturowej.

Słowa kluczowe: chłodnictwo, przemiany fazowe, niestabilności.

Investigations of the displacement of disturbances in a condensing refrigeration medium

Abstract

Experimental investigations concerning the displacement of disturbances in the condensing R404A refrigeration medium were conducted. During the investigations, abrupt pressure changes were triggered off on the measuring facility in a condenser chilled with air. A pressure increase in the pipe channel of the condenser caused an expansion of the condensation of the refrigeration medium, while a pressure drop resulted in its fading. It was found that this phenomenon is of a wavy nature. The disturbances introduced were displaced with a finite velocity, which depended on the parameters of the two-phase medium in the form of pressure and temperature waves.

Keywords: refrigeration, phase exchanges, instabilities.

1. Oznaczenia

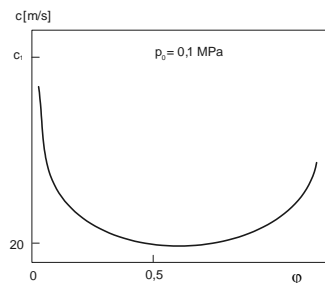
- c – prędkość dźwięku, m/s,
- d – średnica wewnętrzna kanału, m,
- L – długość węzownicy rurowej, m,
- p – ciśnienie, MPa,
- Δp – spadek ciśnienia, MPa,
- q – gęstość strumienia ciepła, W/m²,
- T – temperatura, K
- $(w\rho)$ – gęstość strumienia masy, kg/m²s,
- v – prędkość fali, m/s,
- x – stopień suchości,
- φ – stopień zapełnienia,
- ρ – gęstość, kg/m³,
- θ – czas cyklu zaburzenia periodycznego, s,
- τ – czas, s,

Indeksy dolne dotyczą: p – ciśnienia, s – nasycenia, t – temperatury. Indeksy górne dotyczą: ' – cieczy, '' – pary.

2. Wstęp

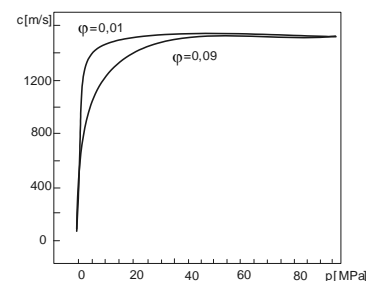
Układ dwufazowy ciecz - gaz, jedno- lub wieloskładnikowy jest zbiorem cząstek substancji o dwóch stanach skupienia, oddzielonych od siebie powierzchnią międzyfazową. Od wewnętrznej struktury układu zależy wzajemne oddziaływanie poszczególnych faz, jak również prędkość przepływu zaburzenia wywołanego przyczyną zewnętrzną lub wewnętrzną. Widać to wyraźnie na przykładzie rozchodzenia się fali dźwiękowej w adiabatycznym układzie dwufazowym. Prędkość fali dźwiękowej c zależy przede wszystkim od stopnia zapełnienia φ i od ciśnienia mieszaniny dwufazowej (rys. 1 i rys. 2). Z przedstawionych wykresów wynika, że ze wzrostem ciśnienia wzrasta prędkość dźwięku w mieszaninie dwufazowej. Tendencja taka występuje jednak do określonego ciśnienia (którego wartość zależy od stopnia zapełnienia) a następnie, przy odpowiednio wysokich ciśnieniach jest prawie stała i wynosi około 1300 m/s [9].

Podczas rozchodzenia się fali zaburzeń w mieszaninie dwufazowej jednoskładnikowej o parametrach termicznych określonych dla stanów na linii nasycenia, propagacja fali zaburzeń powoduje periodyczną zmianę lokalnych wartości ciśnienia, co z kolei wywołuje ciągły proces przemian fazowych. Na granicy faz następuje lokalnie, przy wzroście ciśnienia, proces kondensacji, zaś przy obniżeniu ciśnienia proces parowania. Ulegają zmianie lokalne wartości parametrów układu dwufazowego: ciśnienie nasycenia p_s , temperatura nasycenia T_s , gęstość ρ , stopień suchości x , stopień zapełnienia φ itp. Zjawiska te wywołują „efekt tłumienia” związany z dyssypacją energii oraz zmianą prędkości rozchodzenia się zaburzeń [1, 10].



Rys. 1. Zależność prędkości dźwięku c od wartości średniego stopnia zapełnienia φ w mieszaninie dwufazowej [9]

Fig. 1. Dependence of sound velocity c on medium filling level value φ in two-phase mixture [9]



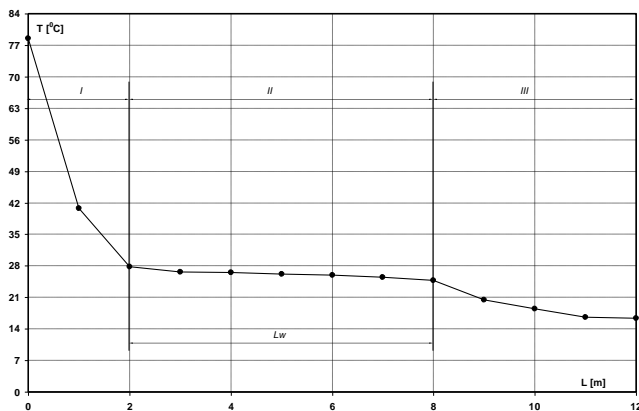
Rys. 2. Zależność prędkości dźwięku c od amplitudy ciśnienia przy stałych poziomach stopnia zapełnienia φ [9]

Fig. 2. Dependence of sound velocity c on pressure amplitude at constant filling levels φ [9]

W układzie dwufazowym w stanie nierównowagowym ma miejsce ewolucja sygnału zaburzeń. Przepływ dwufazowy posiada również dyspersyjne własności falowe, które objawiają się tym, że prędkość rozchodzenia się małych zaburzeń zależy od ich częstotliwości [9, 11, 13]. Badania eksperymentalne przeprowadzone dla przepływów dwufazowych jednoskładnikowych i dwuskładnikowych wykazały, że możliwe są przepływy dwufazowe podkrytyczne w dyszach *de Laval*, mające miejsce przy stosunku ciśnień: na wlocie do dyszy i ciśnienia stacjonarnego nawet do wartości około 0,2 i niżej. Należy podkreślić, że dokładne poznanie mechanizmu przemieszczania się zaburzeń w ośrodku dwufazowym jest bardzo istotne ze względu na zapewnienie stabilnej pracy maszyn i urządzeń. Określenie wartości prędkości tych zaburzeń odgrywa decydującą rolę w opisie pracy instalacji cieplnych i chłodniczych w warunkach regulacji automatycznej, w zapobieganiu awariom oraz minimalizowaniu skutków ich wystąpienia [2, 8, 12].

3. Skraplanie czynnika chłodniczego w przepływie

W instalacjach chłodniczych małej i średniej mocy mają zastosowanie skraplacze zbudowane w postaci pęczka rur, wewnątrz których następuje proces skraplania czynnika roboczego [6, 7, 14, 15]. Odcinki rur prostych poziomych połączone są kolanami tworząc węzownice rurowe o znacznej długości. W jednym skraplaczu może być jedna lub kilka węzownic ustawionych równoległe względem siebie, zasilanych ze wspólnego kolektora parą przegrzaną czynnika chłodniczego. Podczas skraplania w przepływie, można wyodrębnić trzy podstawowe strefy wymiany ciepła (rys. 3).



Rys. 3. Schemat ideowy procesu skraplania czynnika w przepływie w węzownicy rurowej; L_w – długość węzownicy objęta procesem skraplania (strefa skraplania właściwego)

Fig. 3. Schematic diagram of medium condensation process in flow in a coil tube; L_w – coil tube length covered by condensation process (proper condensation area)

W strefie pierwszej (I) znajdującej się na początku węzownicy odbywa się proces schładzania przegrzanej pary czynnika chłodniczego, która przepływa w węzownicy. Po zakończeniu schładzania rozpoczyna się proces skraplania (strefa II), podczas którego ciśnienie i temperatura czynnika chłodniczego wzajemnie zależą od siebie. Po zakończeniu skraplania czynnik chłodniczy w postaci cieczy ulega dochłodzeniu (strefa III). Względna długość strefy schładzania przegrzanych par, skraplania właściwego i dochłodzenia cieczy zależy od ilości doprowadzanego do węzownicy czynnika, ta zaś od obciążenia cieplnego skraplacza. W stanie ustalonym w strefie schładzania przegrzanej pary następuje gwałtowny spadek temperatury czynnika chłodniczego na długości węzownicy rurowej, natomiast w strefie skraplania właściwego temperatura czynnika ulega niewielkiemu obniżeniu. Natomiast w strefie dochłodzenia temperatura czynnika dalej znacznie się obniża. Wskutek oporów przepływu ciśnienie obniża

się sukcesywnie wzdłuż drogi przepływu czynnika na długości węzownicy rurowej. Podczas występowania zaburzeń procesu skraplania mogą wystąpić odchylenia od powyższych przebiegów oraz oscylacje wartości ciśnienia i temperatury.

4. Cel i przedmiot badań eksperymentalnych

Aktualny stan wiedzy w zakresie niestabilności występujących w ośrodkach dwufazowych urządzeń energetycznych wskazuje, że w większości przypadków niestabilności te wykazują własności falowe. Dotyczy to niestabilności związanych ze zmianą gęstości strumienia masy, niestabilności temperaturowych, ciśnieniowych, niestabilności związanych ze zmianą udziału faz, z rozpoczęciem i zakończeniem przemiany fazowej, niestabilności występujących w postaci fali uderzeniowej, podczas interferencji fal powierzchniowych itp. Należy podkreślić, że wymienione niestabilności nie są z reguły zjawiskami pożądanymi, bowiem powodują problemy w eksploatacji maszyn i urządzeń energetycznych, zakłócenia w systemach automatyki, a w niektórych przypadkach mogą prowadzić nawet do zniszczenia układu.

Szczególnym typem urządzenia energetycznego, niezwykle „czułym” na oddziaływania wywołujące niestabilności jest sprężarkowe urządzenie chłodnicze. Podczas przemiany fazowej skraplania występują w skraplaczu chłodniczym liczne niestabilności, a wśród nich:

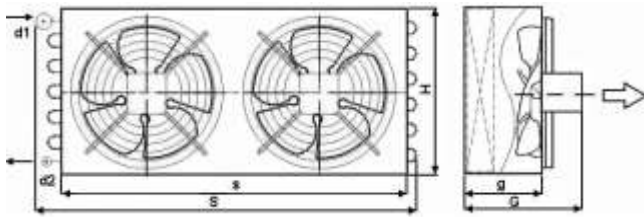
- niestabilności dotyczące położenia stanu początkowego przemiany fazowej skraplania,
- zjawiska falowe występujące podczas rozwoju i zaniku procesu skraplania,
- powstanie i rozprzestrzenianie się frontu skraplania w przepływie,
- wpływ zaburzeń generowanych jednostkowo i periodycznie na przebieg przemian fazowych,
- specyficzny charakter niestabilności podczas przemian fazowych w węzownicach rurowych w warunkach regulacji automatycznej.

Mając powyższe na uwadze przeprowadzono badania eksperymentalne procesu skraplania w węzownicy rurowej skraplacza w warunkach zaburzeń zewnętrznych, które stanowią kontynuację badań, dotyczących przemian fazowych czynników chłodniczych w warunkach zaburzeń zewnętrznych jednostkowych i generowanych periodycznie [3, 4, 5].

Celem badań było rozpoznanie, zarejestrowanie i opis zjawisk zachodzących podczas stanów niestabilnych występujących wewnątrz węzownicy rurowej ze skraplającym się czynnikiem chłodniczym. Wywoływane zaburzenia stanowiły eksperymentalną symulację sytuacji występujących w praktyce eksploatacyjnej, np. awaria, pęknięcie przewodu rurowego, powstanie niedrożności w przewodzie, przymknięcie zaworu, nagły wzrost lub spadek obciążenia cieplnego skraplacza, rozruch lub zakończenie pracy instalacji itp.

Badania eksperymentalne procesu skraplania w przepływie wykonano wykorzystując lamelowny skraplacz chłodzony powietrzem. Zewnętrzna powierzchnia wymiany ciepła skraplacza wynosiła $60,5 \text{ m}^2$. Blok lamelowny skraplacza zbudowany był z odcinków rur prostych miedzianych (o średnicach $\phi 10/\phi 8 \text{ mm}$), połączonych za pomocą kolanek rurowych. Od zewnątrz ozebrowanie tworzyły nasadzone lamele aluminiowe w liczbie 646 sztuk, z podziałką $0,7 \text{ mm}$. Rury miedziane rozstawione były w bloku lamelownym szachownicowo, z podziałką $25 \times 50 \text{ mm}$. Liczba rzędów rur w kierunku przepływu powietrza wynosiła 3, a w kierunku poprzecznym – 32 (całkowita liczba rur w bloku była równa 96).

Czynnik chłodniczy R404A, zasilający skraplacz był doprowadzany do skraplacza za pomocą kolektora rozdzielczego z podziałem na 6 równoległe włączonych węzownic. Całkowita długość brutto każdej węzownicy rurowej wynosiła $22,56 \text{ m}$, zaś długość netto (bez uwzględnienia kolan) – $21,12 \text{ m}$. Na wypływie ze skraplacza zamontowano kolektor zbiorczy do odbioru kondensatu wpływającego z każdej węzownicy. Schemat budowy skraplacza oraz jego widok zamieszczono na rys. 4 i 5.



Rys. 4. Schemat ideowy badanego skraplacza (widok z góry)
Fig. 4. Schematic diagram of a condenser under investigation (view from above)



Rys. 5. Widok skraplacza na stanowisku badawczym
Fig. 5. View of the condenser on the experimental set-up

5. Stanowisko pomiarowe

Badania eksperymentalne zrealizowano na stanowisku pomiarowym, którego schemat ideowy przedstawiono na rys. 6. Umożliwiało ono wykonanie pomiarów eksperymentalnych procesu skraplania czynnika chłodniczego R404A w węzownicy rurowej skraplacza chłodzonego powietrzem w warunkach zaburzeń zewnątrznych. Badany skraplacz *I* oraz skraplacz dodatkowy *IA* włączono w obieg jednostopniowej sprężarkowej instalacji chłodniczej. Skraplacz *IA* pełnił rolę aparatu zabezpieczającego instalację chłodniczą przed niepożądanymi skutkami generowanymi podczas badań oddziaływań zewnątrznych. Para przegrzana czynnika chłodniczego R404A, opuszczająca króciec tłoczny sprężarki tłokowej agregatu była kierowana, po przejściu przez odolejacz do badanego skraplacza *I* i skraplacza dodatkowego *IA*. Zmianę obciążenia cieplnego skraplacza uzyskiwano przez zmianę obciążenia cieplnego w izolowanej komorze chłodniczej, w której umieszczono wentylatorową chłodnicę powietrza (z oprzyrządowaniem). Układ zaworów pozwalał na uzyskanie warunków symulacji impulsowej lub periodycznej.

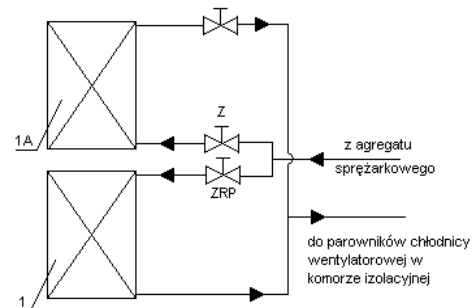
Na długości $L_{brutto} = 22,56$ m wybranej węzownicy rurowej badanego skraplacza powietrznego zamontowano czujniki termoelektryczne typu K (o średnicy termoelektrod 0,2 mm) w liczbie 15 sztuk oraz 5 czujników tensometrycznych typu PT-5101M/2,5 MPa do pomiaru ciśnienia czynnika chłodniczego. Na rys. 7 przedstawiono schematy rozmieszczenia czujników do pomiaru temperatury i ciśnienia na długości węzownicy rurowej skraplacza. Na rys. 8 pokazano widok montażowy zainstalowanych czujników do pomiaru ciśnienia.

Wszystkie czujniki pomiarowe temperatury i ciśnienia uprzednio wywzorcowano sporządzając ich indywidualne charakterystyki. Zastosowano komputerowe karty pomiarowe odpowiednio typu *PCI 1710Hg* i *PCL 818HG* włączone do komputerowego systemu akwizycji danych. Do tego systemu włączono również elektroniczny przepływomierz czynnika chłodniczego typu *Massflo* firmy *Danfoss*.

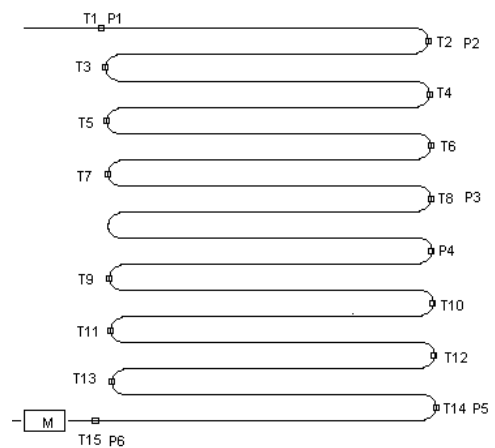
Badania eksperymentalne zrealizowano w typowym dla eksploatacji skraplaczy zakresie zmian parametrów cieplno-przepływowych:

- gęstości strumienia ciepła $q = 5,5 \div 30$ kW/m²,
- gęstości strumienia masy czynnika chłodniczego $(w\rho) = 45 \div 500$ kg/m²s,
- temperatury skraplania $T_s = 20 \div 40$ °C.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że wartości temperatury wyznaczano z dokładnością $\pm 0,1$ °C, gęstości strumienia ciepła q i masy $(w\rho)$ z dokładnością ± 6 % zaś prędkości przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia i temperatury z dokładnością ± 10 %. Przeprowadzone badania obejmowały rozwój i zanik procesu skraplania.



Rys. 6. Schemat stanowiska badawczego; *I* – badany skraplacz chłodzony powietrzem, *IA* – skraplacz dodatkowy, *ZRP* – zawór regulacyjny
Fig. 6. Schematic diagram of experimental facility; *I* – condenser under investigation chilled with air, *IA* – additional condenser, *ZRP* – control valve



Rys. 7. Schemat ideowy rozmieszczenia czujników do pomiaru temperatury i ciśnienia na długości węzownicy rurowej badanego skraplacza
Fig. 7. Schematic diagram of the arrangement of sensors for temperature and pressure measurements along of the coil tube length of the condenser under investigation

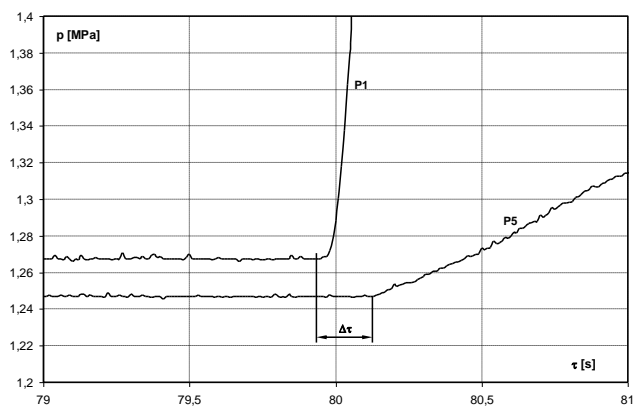


Rys. 8. Widok czujników pomiarowych zainstalowanych w przekrojach węzownicy rurowej
Fig. 8. View of measuring sensors installed in the coil tube cross-sections

6. Wyniki badań

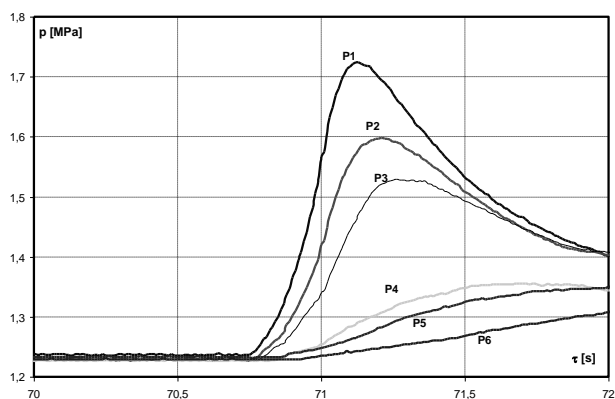
W trakcie badań eksperymentalnych zjawisko rozchodzenia się zaburzeń w warunkach rozwoju procesu skraplania w przepływie w węźownicy rurowej skraplacza wywoływano przez gwałtowne (skokowe) otwarcie zaworu zasilającego ZRP.

Skokowe otwarcie zaworu zasilającego ZRP węźownicę badanego skraplacza powodowało rozpoczęcie skraplania w przepływie. Proces ten rozpoczynał się w przekroju wlotowym węźownicy rurowej i przemieszczał na długości węźownicy. Przepływ czynnika chłodniczego poprzedzony był przejściem sygnału zmiany ciśnienia, czyli tzw. falą ciśnieniową. Na rys. 9 przedstawiono przykładowo wyniki badań eksperymentalnych w postaci zależności ciśnienia czynnika chłodniczego R404A od czasu, między wskazaniami czujników w przekroju wlotowym i wylotowym węźownicy. Pomiedzy przekrojami, w których mierzono ciśnienie czynnika chłodniczego występuje opóźnienie $\Delta\tau$ w rejestracji zmiany ciśnienia.



Rys. 9. Zależność zmiany ciśnienia czynnika chłodniczego R404A od czasu mierzona w przekroju wlotowym do węźownicy rurowej (P1) i w przekroju wylotowym (P5) podczas rozwoju skraplania w przepływie
Fig. 9. Dependence of the pressure change of R404A refrigeration medium from time measured in inlet cross-section to coil tube (P1) and in outlet cross-section (P5) during expansion of condensation in flow

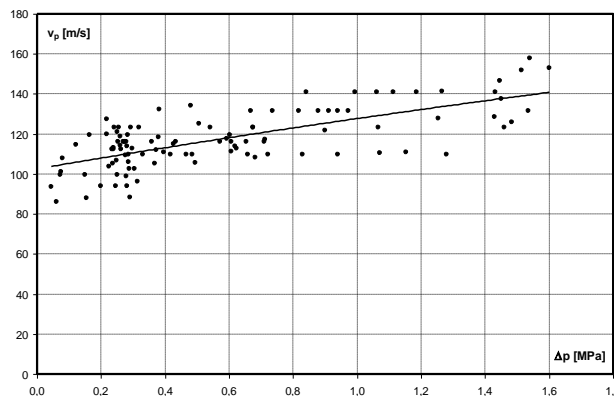
Na rys. 10 przedstawiono zmiany ciśnienia czynnika chłodniczego podczas rozwoju skraplania w funkcji czasu i odległości przekroju pomiarowego od przekroju wlotowego do węźownicy rurowej.



Rys. 10. Eksperymentalna zależność ciśnienia czynnika chłodniczego R404A od czasu i położenia przekroju pomiarowego od wlotu do węźownicy rurowej; gęstość strumienia masy (w_p) = 141,6 kg/(m²·s)
Fig. 10. Experimental dependence of R404A refrigeration medium pressure on time and measuring cross-section location from the inlet to a coil tube; mass flux density (w_p) = 141,6 kg/(m²·s)

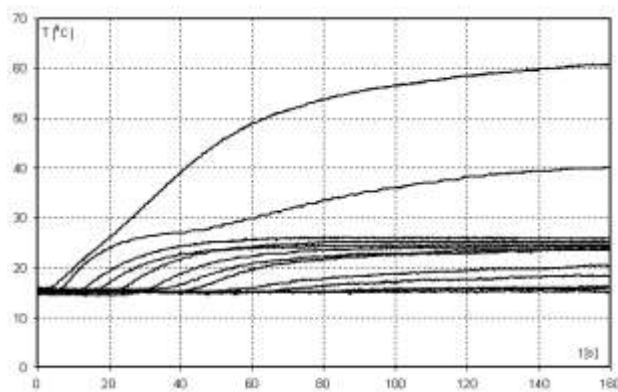
Z przebiegu tej zależności w czasie wynika również, że istnieje opóźnienie czasowe wzrostu wartości ciśnienia na wyplwyie względem wartości ciśnienia na dopływie czynnika do węźownicy. Świadczy to o przemieszczaniu się sygnału podwyższonego

ciśnienia wzdłuż węźownicy z określoną prędkością v_p . Wartość tej prędkości określono dzieląc odległość pomiędzy punktami rejestracji sygnału ciśnienia przez czas opóźnienia $\Delta\tau$ (rys. 9). Na rys. 11 przedstawiono eksperymentalne zależności prędkości fali ciśnieniowej v_p od wielkości skokowej zmiany ciśnienia Δp w warunkach rozwoju skraplania.



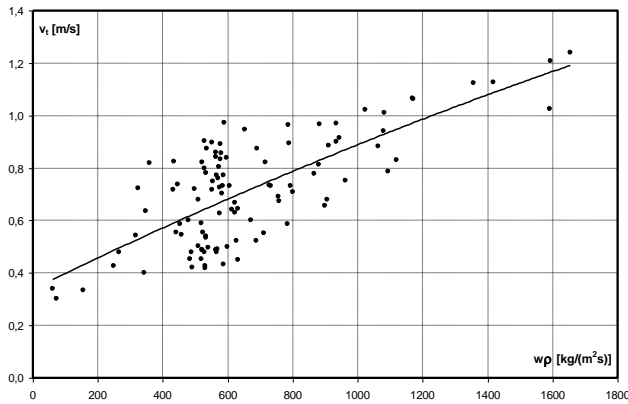
Rys. 11. Eksperymentalna zależność prędkości v_p fali ciśnieniowej od skokowej zmiany ciśnienia Δp podczas rozwoju skraplania w przepływie w węźownicy rurowej
Fig. 11. Experimental dependence of pressure wave velocity v_p on abrupt pressure change Δp during expansion of condensation in flow in a coil tube

Rys. 12 przedstawia przykładowo przebieg zmian wartości temperatury ścianki węźownicy rurowej po otwarciu zaworu odcinającego. Zaobserwowano sukcesywne podwyższanie się temperatury ścianki, jakie towarzyszy przepływowi pary przegrzanej a następnie skraplającego się czynnika wzdłuż węźownicy. Rozmieszczone na długości węźownicy czujniki do pomiaru temperatury rejestrowały kolejno wzrost temperatury w czasie, który towarzyszył przemieszczaniu się frontu skraplania. Jako ostatni zareagował czujnik umieszczony na końcu węźownicy, który zarejestrował najmniejszy wzrost temperatury, co świadczy o występowaniu strefy dochłodzenia cieczy w skraplaczu. Proces skraplania odbywał się, więc nie na całej długości węźownicy. W strefie skraplania właściwego temperatura czynnika i ścianki kanału była funkcją ciśnienia, które najniższą wartość osiągało na wyplwyie czynnika z węźownicy rurowej.



Rys. 12. Zmiana temperatury ścianki w czasie na długości całej węźownicy rurowej podczas rozwoju skraplania w przepływie w węźownicy rurowej; $p_2 = 1,496$ MPa, (w_p) = 124 kg/m²·s, $q = 11543$ W/m², $v_i = 0,17$ m/s
Fig. 12. Change of wall temperature in time along the whole coil tube length during expansion of condensation in flow in a coil tube: $p_2 = 1,496$ MPa, (w_p) = 124 kg/m²·s, $q = 11543$ W/m², $v_i = 0,17$ m/s

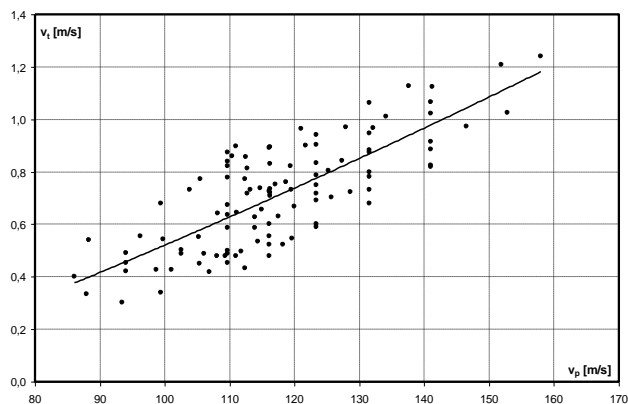
Postępując analogicznie jak w analizie przejścia fali ciśnieniowej określono prędkość v , przemieszczania się fali temperaturowej związanej z przejściem frontu skraplania (rys. 13).



Rys. 13. Eksperymentalna zależność prędkości v_t fali temperaturowej od gęstości strumienia masy (w_p) czynnika chłodniczego podczas rozwoju skraplania w przepływie w węzownicy rurowej

Fig. 13. Experimental dependence of wave temperature velocity v_t on mass flux density (w_p) of refrigerant medium during expansion of condensation in flow in a coil tube

Z prezentowanych wyników badań wynika, że prędkość fali temperaturowej (frontu skraplania) v_t jest znacznie mniejsza, od wartości prędkości v_p przemieszczania się sygnału ciśnienia. Wyniki badań potwierdziły również istnienie zależności między prędkością v_p i prędkością v_t (rys. 14). W zakresie skokowej zmiany wielkości ciśnienia $\Delta p = 0 \div 1,6$ MPa nastąpiła zmiana prędkości v_p fali ciśnieniowej w przedziale $v_p = 100 \div 140$ m/s oraz prędkości v_t frontu skraplania $v_t = 0,5 \div 1$ m/s. Wyniki badań potwierdzają fakt, że wartość prędkości frontu skraplania jest o około dwa rzędy wielkości mniejsza od prędkości fali ciśnieniowej. A zatem najpierw następuje przemieszczanie sygnału zmiany ciśnienia z prędkością 100 m/s i wyższą, a następnie przemieszcza się sygnał zmiany temperatury z prędkością nie przekraczającą 1 m/s.

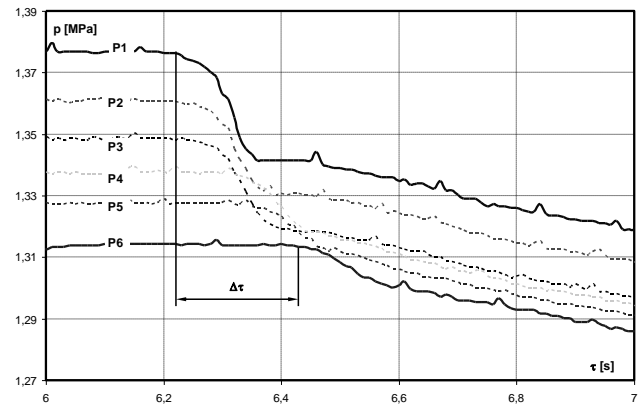


Rys. 14. Eksperymentalna zależność prędkości v_t frontu skraplania od prędkości v_p fali ciśnieniowej w warunkach rozwoju skraplania podczas zaburzeń impulsowych

Fig. 14. Experimental dependence of condensation front velocity v_t on pressure wave velocity v_p under conditions of condensation expansion during impulse disturbances

Analogicznie przeprowadzono badania w zakresie zaniku procesu skraplania w węzownicy rurowej skraplacza. Przez skokowe zamknięcie zaworu zasilającego (ZRP) uzyskano eksperymentalne warunki generowania jednostkowych zaburzeń zewnętrznych. Skokowe zamknięcie zaworu zasilającego (ZRP) powodowało gwałtowne zatrzymanie dopływu czynnika chłodniczego – pary przegrzanej do skraplacza. Najpierw zaobserwowano przejście fali ciśnieniowej w kierunku przepływu czynnika, a następnie występowało skrócenie i zanik strefy skraplania właściwego. Dalej następowało obniżenie temperatury ścianki węzownicy rurowej i przejście fali temperaturowej. Opisane zmiany jakościowe tego zjawiska potwierdziły wyniki badań eksperymentalnych (rys. 15).

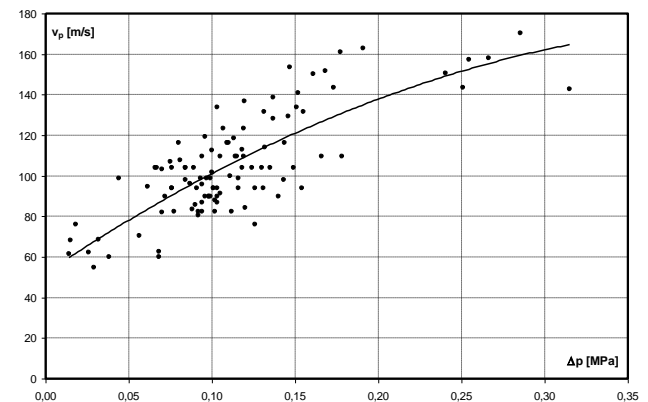
Z przeprowadzonych badań wynika, że również w tym przypadku istniało opóźnienie czasowe spadku wartości ciśnienia w przepływie czynnika w węzownicy. Sygnał obniżonego ciśnienia przemieszczał się wzdłuż węzownicy z prędkością v_p , której wartość w badanym przedziale zmian parametrów mieściła się w zakresie $v_p = 50 \div 170$ m/s (rys. 16). Natomiast uzyskane wartości prędkości fali temperaturowej (frontu skraplania) v_t były znacznie większe od tych, jakie towarzyszyły rozwojowi skraplania i mieściły się w przedziale $v_t = 2 \div 4,3$ m/s (rys. 17).



Rys. 15. Wyniki badań eksperymentalnych zależności ciśnienia od czasu i położenia przekroju pomiarowego na długości węzownicy rurowej w warunkach zaniku skraplania w przepływie; (w_p) = 288,2 kg/(m²·s)

Fig. 15. Results of experimental investigations of the dependence of pressure on the time and measuring cross-section location along the coil tube length under conditions of condensation fading in flow; (w_p) = 288,2 kg/(m²·s)

Podobnie, jak w badaniach dotyczących rozwoju skraplania wykonano dla warunków zaniku tego procesu wykresy zależności prędkości przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia – v_p oraz temperatury – v_t . Rys. 16 ilustruje eksperymentalną zależność prędkości v_p od wielkości zmiany spadku ciśnienia Δp , a rys. 17 eksperymentalną zależność prędkości v_t od gęstości strumienia masy (w_p).

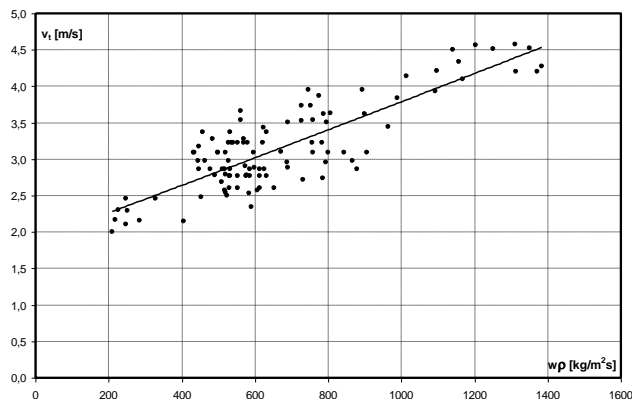


Rys. 16. Zależność prędkości v_p przemieszczania się fali ciśnieniowej od wielkości spadku ciśnienia Δp w procesie zaniku skraplania w węzownicy rurowej

Fig. 16. Dependence of pressure wave displacement velocity v_p on pressure drop value Δp in condensation fading process in a coil tube

Niestabilności procesu skraplania czynnika chłodniczego badano również w warunkach zaburzeń generowanych periodycznie. Program badań uwzględniał wpływ zmiany czasu trwania cyklu θ . Czas trwania cyklu θ był sumą czasu, podczas którego zawór ZRP był zamknięty oraz czasu, gdy zawór był otwarty. W badaniach zastosowano metodę równego podziału czasu trwania cyklu θ w proporcji 50/50%. Oznaczało to, że dla $\theta = 10$ s zawór był zamknięty przez 5 s, po czym otwierano go na 5 s itd. Badania przeprowadzono dla cykli $\theta = 10$ s, 20 s, 30 s, 40 s i 60 s. Podczas pomiarów rejestrowano w poszczególnych cyklach następujące

wielkości: masowe natężenie czynnika chłodniczego R404A, ciśnienie w 5 przekrojach wężownicy rurowej, temperaturę czynnika w 15 przekrojach (wg schematu rozmieszczenia czujników podanego na rys. 7).



Rys. 17. Zależność prędkości v_t fali temperaturowej (frontu skraplania) od gęstości strumienia masy (w_p) czynnika chłodniczego podczas zaniku skraplania w wężownicy rurowej

Fig. 17. Dependence of temperature wave velocity v_t (condensation front) on mass flux density (w_p) of refrigeration medium during condensation fading in a coil tube

Na rys. 18 przedstawiono przykładowo zmiany natężenia przepływu czynnika chłodniczego, jego ciśnienia i temperatury dla kilku kolejnych cykli o czasie $\theta = 20$ s. Otwarcie zaworu zasilającego wężownicę rurową objawiało się wyraźnym impulsem wzrostu ciśnienia czynnika rys. 18b. Występowały przy tym maksymalne wartości ciśnienia. Ze wzrostem czasu otwarcia zaworu odnotowano spadek ciśnienia do wartości poziomu ciśnienia przemiany fazowej skraplania. Zamknięcie zaworu zasilającego objawiało się spadkiem ciśnienia. Otwarcie i zamknięcie zaworu zasilającego towarzyszyły cyklicznie powtarzające się zmiany natężenia przepływu \dot{m} czynnika chłodniczego – rys. 18a. W fazie otwarcia zaworu następował wzrost natężenia przepływu, który osiągał wartość maksymalną w danym cyklu, a następnie (po zamknięciu zaworu) następował spadek natężenia przepływu. Zauważono, że dla niższych wartości czasu trwania cyklu $\theta = 10 - 20$ s występował falowy charakter zmiany natężenia przepływu, zbliżony do przebiegu sinusoidalnego. Dla wartości $\theta > 20$ s występowała zmiana przebiegu tej charakterystyki. Dla $\theta = 30 - 40$ s, podczas fazy zamknięcia zaworu zasilającego natężenie przepływu spadało praktycznie do poziomu $\dot{m} = 0$.

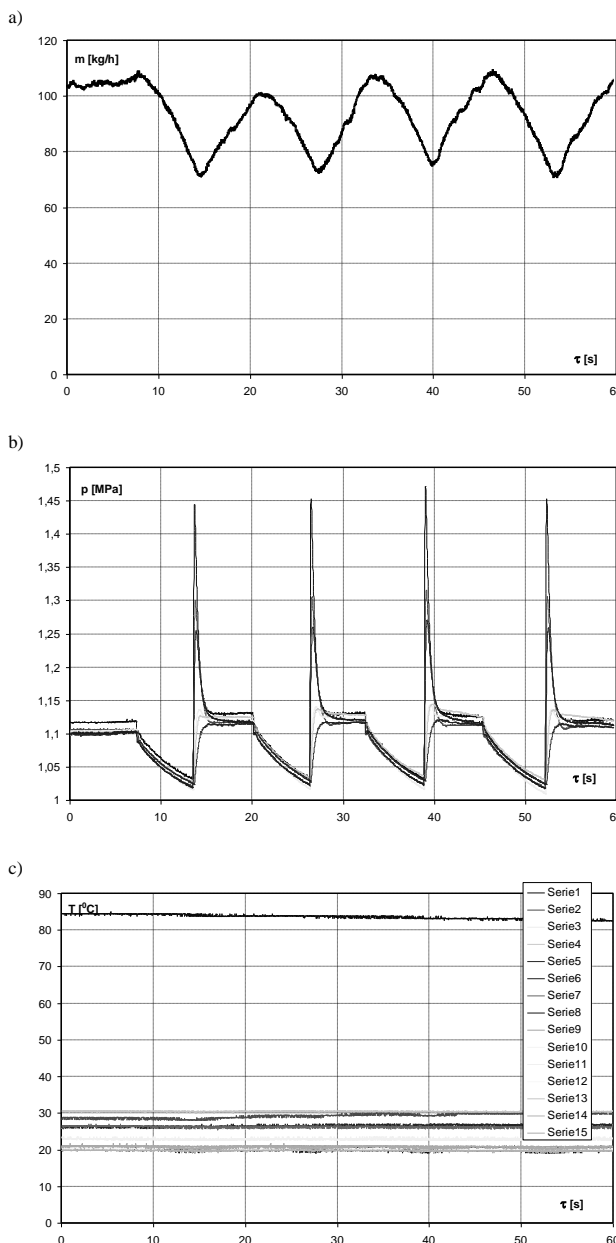
Odnotowano inny charakter zmiany temperatury czynnika chłodniczego (w porównaniu z charakterystyką ciśnieniową) w okresach otwarcia i zamknięcia zaworu – rys. 18c. Zmiana temperatury czynnika wykazywała we wszystkich badanych przypadkach charakter pulsacyjny, bez wyraźnych zmian w danym cyklu. Różnice w przebiegu charakterystyk ciśnieniowej i temperaturowej w danym cyklu zaburzeń periodycznych można tłumaczyć różnymi, pod względem wartości, prędkościami przemieszczania się sygnałów zmiany ciśnienia – v_p i temperatury – v_t . Wyniki badań potwierdziły, że wartość prędkości v_p fali ciśnieniowej jest o około dwa rzędy większa od prędkości v_t przemieszczania się fali temperaturowej. Założony czas trwania cyklu zaburzeń periodycznych $\theta = 10 - 60$ s był za krótki, aby można było odnotować pełne przejście fali temperaturowej. Pewną rolę odgrywała w tym również bezwładność cieplna układu, oddziałująca dodatkowo w formie „tłumienia” przebiegu sygnału zmiany temperatury.

7. Podsumowanie

1. Przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdziły falowy charakter rozchodzenia się zaburzeń w ośrodku dwufazowym ze skraplającym się czynnikiem chłodniczym. Sygnały wywołane zakłóceniami przemieszczają się w instalacjach energetycznych z określoną prędkością. Można wyróżnić prędkość prze-

mieszczania się sygnału zmiany ciśnienia i prędkość przemieszczania się sygnału temperatury. Wartości tych prędkości zależą od parametrów ośrodka dwufazowego.

- Po wywołaniu zaburzenia jednostkowego (podczas otwarcia lub zamknięcia zaworu) następowało przejście fali ciśnieniowej z prędkością v_p , a następnie przepływał czynnikiem chłodniczym, co objawiało się zmianą temperatury czynnika i ścianki kanału. Każdorazowo rejestrowano przejście fali temperaturowej z prędkością v_t ($v_t \neq v_p$).
- Badania dowiodły, że istnieje zależność pomiędzy wartościami v_p i v_t . Większym wartościom v_p odpowiadają wyższe wartości v_t i odwrotnie.



Rys. 18. Eksperymentalne wyniki badania procesu skraplania czynnika chłodniczego w wężownicy rurowej w warunkach zaburzeń generowanych periodycznie; warunki pomiaru: czas trwania cyklu $\theta = 20$ s, (w_p) = 569,6 kg/(m²·s), $p_1 = 1,12$ MPa, $T_1 = 84,6$ °C; zmiana w czasie wielkości: a) masowe natężenie przepływu \dot{m} , b) ciśnienie p , c) temperatura czynnika T

Fig. 18. Experimental results of the investigation of refrigeration medium condensation process in a coil tube under conditions of periodically generated disturbances; measurement conditions: duration of cycle $\theta = 20$ s, (w_p) = 569,6 kg/(m²·s), $p_1 = 1,12$ MPa, $T_1 = 84,6$ °C; change in time of the following values: a) mass flow rate \dot{m} , b) pressure p , c) refrigeration medium temperature T

8. Literatura

- [1] Bilicki Z., Kardaś D., Michaelides E.E., Relaxation models for wave phenomena in liquid - vapour bubble flow in channels, *J. Fluids Engineering*, No. 120, pp. 369–377, 1998.
- [2] Bohdal T.: Przyczyny niestabilności przemian fazowych czynników energetycznych. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, 2006, stron 282.
- [3] Bohdal T.: Investigation of boiling of refrigerating medium under conditions of impulse disturbances. *An International Journal of Experimental Heat Transfer*, 2004, Volume 17, No 2, pp. 103 – 117.
- [4] Bohdal T.: Development of bubbly boiling in refrigeration heat exchangers. *An International Journal of Heat Exchangers*, 2004, No 1, Volume V, pp. 179 – 199.
- [5] Bohdal T., Kuczyński W.: Investigation of boiling of refrigeration medium under periodic disturbance conditions. *An International Journal of Experimental Heat Transfer*, 2005, Volume 18, No 3, pp. 135 – 151.
- [6] Bohdal T., Charun H., Czapp M., Majka K.: An investigation of a condensation process efficiency in freon air-cooled condenser coils. *Recent Advances in Heat Transfer*. Edited by B. Sunden and Žukauskas, Elsevier-Amsterdam 1992, pp. 330-342.
- [7] Dobson M.K., Chato J.C.: Condensation in smooth horizontal tubes. *I. Heat Transfer ASME* 1998, vol. 120, pp. 193-213.
- [8] Mitrovic J., Fauser J., Propagation of two-phase fronts during boiling of superheated liquids, *Proc. 2nd European Symp. "Fluids in Space"*, Naples, Italy, 1996.
- [9] Nakoryyakov V.E., Pokusaev B.G., Shreiber I.R., *Wave propagation in gas-liquid media*, Bergles A.E. (Editor) by CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, 1993.
- [10] Nigmatulin R.I.: *Dynamics of multiphase media*. Hemisphere, New York, 1990.
- [11] Nosoko T., Yoshimura P.N., Nagata T., Oyakawa K.: Characteristics of two-dimensional waves on a falling liquid film. *Chem. Eng. Sci.* 1996, vol. 51 (5), pp. 725–732.
- [12] Park S.K., Kim M.H., Yoo K.J.: Condensation of pure steam and steam-air mixture with surface waves of condensate film on a vertical wall. *Int. J. Multiphase Flow* 1996, vol. 22, No 5, pp. 893-908.
- [13] Pavlenko A.N., Lel V.V.: Model of self-maintaining evaporation front for superheated liquids. *Proceedings of the Third International Conference on Multiphase Flow, ICMF'98*, Lyon, France, June 8 - 12. 1998, pp. 366 – 374.
- [14] Tandon T.N.: Heat transfer during forced convection condensation inside horizontal tube. *Int. J. of Refrigeration* 1995, vol. 18, no. 3, pp. 156-162.
- [15] Thomas R.M.: Condensation of steam in turbulent motion. *Int. J. Multiphase Flow* 1979, vol. 5, pp. 1-15.

Artykuł recenzowany

INFORMACJE





CONTROL-TECH

X Targi Przemysłowej Techniki Pomiarowej

29.09-1.10.2009, Kielce

Zakres branżowy targów:

1. Pomiar długości i kąta
2. Przyrządy pomiarowe
3. Maszyny pomiarowe
4. Urządzenia pomiarowe specjalnego zastosowania
5. Elementy do urządzeń pomiarowych i badawczych
6. Badanie materiału
7. Aparatura do prób nieniszczących
8. Aparatura analityczna

9. Przyrządy do pomiaru wytrzymałości
10. Aparatura do określania innych wielkości fizycznych
11. Inne urządzenia
12. Oprogramowanie do komputerowego wspomaganie zapewnienia jakości
13. Analiza obrazu oraz systemy przetwarzania obrazu
14. Systemy optyczno-elektroniczne
15. Organizacje/ wydawnictwa/ usługi

CENY PROMOCYJNE DO 10 CZERWCA 2009

Targi Kielce, ul. Zakładowa 1, 25-672 Kielce
 Menedżer Targów - **Joanna Adamczyk**, tel. 041 365 12 14
 fax 041 365 13 13, e-mail: adamczyk.j@targikielce.pl

www.control-tech.pl

Patronat Internetowy:  