



Analiza niestabilności przemian fazowych czynników energetycznych. Część I – Ocena stanu wiedzy

Tadeusz Bohdal
Politechnika Koszalińska

1. Wstęp

Zasada działania niektórych maszyn i urządzeń energetycznych opiera się na wykorzystaniu przemian fazowych czynnika energetycznego w obiegu termodynamicznym. Pod pojęciem czynnik energetyczny rozumie się, zarówno nośnik energii, jak również czynnik termodynamiczny podlegający przemianom i uczestniczący w konwersji energii w sposób bezpośredni lub pośredni. Do czynników energetycznych zalicza się, między innymi, wodę, czynniki chłodnicze, wodne roztwory soli itp. Jako udokumentowany należy uznać fakt, że przemiany fazowe czynników energetycznych występujące w parownikach i skraplaczach maszyn i urządzeń są bardzo „wrażliwe” na wszelkie, pojawiające się w eksploatacji zakłócenia, zarówno o charakterze zewnętrznym, jak i wewnętrznym. *Zakłócenia zewnętrzne* są zwykle wynikiem wzajemnego oddziaływania różnych elementów składowych układu, na przykład wywołane pracą elementów automatyki, zakłóceniami w pracy maszyn (pompy, turbiny, sprężarki itp.), przerwami w dopływie prądu elektrycznego itp. Przyczyny powstawania *zakłóceń wewnętrznych* można ogólnie podzielić na dwie grupy, bowiem mogą one tkwić bezpośrednio w mechanizmie przemian fazowych lub w strukturze i właściwościach czynnika roboczego [11, 12].

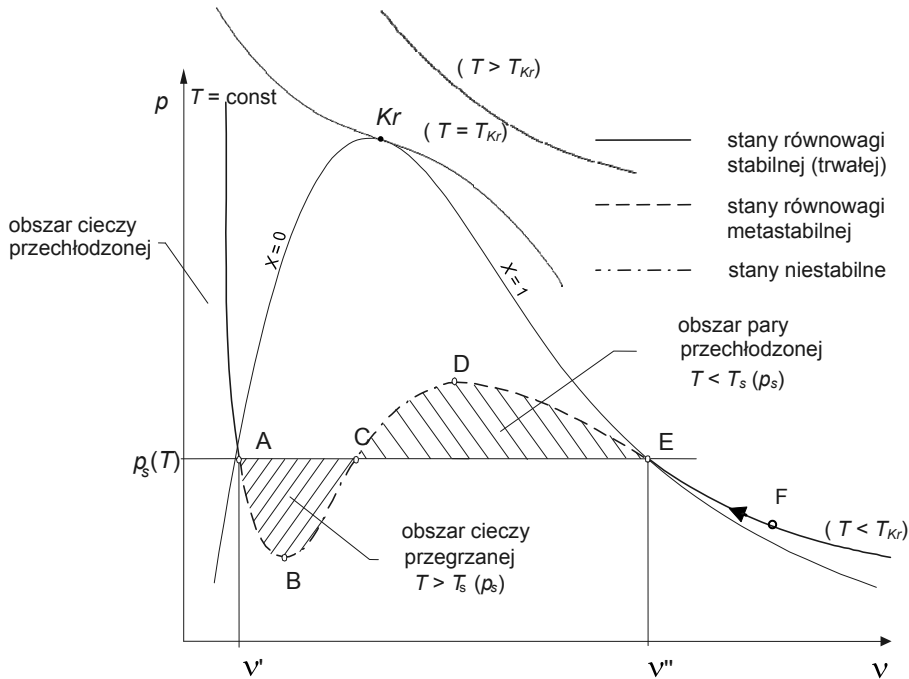
Wrzenie i skraplanie podczas przepływu w kanałach rurowych parownika i skraplacza traktuje się zwykle jako przepływ dwufazowy z wymianą ciepła. W przemianach fazowych występuje kilka następujących po sobie etapów, związanych z tworzeniem nowej fazy (parowej – w przypadku wrzenia i ciekłej – podczas skraplania) w mieszaninie dwufazowej, wskutek oddziaływań energetycznych z ogrzewaną lub chłodzoną powierzchnią ścianki kanału rurowego. Na podkreślenie zasługuje fakt, że są to nie tylko bardzo złożone zjawiska, ale nie można ich (wrzenie i skraplanie) na ogół taktować jako w pełni odwracalne. Poza tym brak jest uogólnionego modelu, opisującego przenoszenie energii w tych procesach. Proces wrzenia w przepływie powinien z teoretycznego punktu widzenia rozpoczynać się od stanu cieczy nasyconej (stopień suchości $x=0$) i dla pełnego procesu odparowania kończyć się w stanie pary nasyconej suchej ($x=1$). Traktowany, podobnie teoretyczny proces skraplania powinien rozpoczynać się od stanu pary nasyconej suchej ($x=1$) i trwać do stanu cieczy nasyconej ($x=0$). W praktyce podany wyżej zakres, obejmujący występowanie przemian fazowych, ulega rozszerzeniu o wrzenie przechłodzone i skraplanie w obszarze pary przegrzanej.

2. Interpretacja jakościowa przyczyn niestabilności

Do wstępnej analizy, dotyczącej wpływu różnych parametrów na powstawanie niestabilności wykorzystano najprostszą wersję równania termicznego stanu gazu rzeczywistego podaną przez *van der Waalsa*, które po przekształceniach uzyskuje postać:

$$pv^3 - (pb + RT)v^2 + av - ab = 0, \quad (1)$$

przy czym po lewej stronie równania występuje wielomian trzeciego stopnia. W interpretacji graficznej, na wykresie w układzie współrzędnych p - v , równanie (1) opisuje dla stałej temperatury T , tzw. *izotermę van der Waalsa*. Mogą istnieć trzy rozwiązania równania (1), to znaczy: trzy pierwiastki rzeczywiste, jeden potrójny lub dwa zespolone i jeden rzeczywisty. Na rys. 1 pokazano graficzne formy rozwiązania równania. W przypadku trzech pierwiastków zauważa się, że izoterma *van der Waalsa* posiada dwa ekstrema (punkty D i B) w obszarze pary nasyconej mokrej.



Rys. 1. Interpretacja izotermy *van der Waalsa* w układzie współrzędnych p - v
Fig. 1. Interpretation of *van der Waals*' isotherm in p - v coordinate system

Należy przypomnieć, że wprowadzone przez *van der Waalsa* poprawki do równania termicznego stanu gazu doskonałego *Clapeyrona* dotyczyły tzw. *covolumenu* gazu rzeczywistego (to znaczy łącznego ujęcia objętości własnej sferycznej cząstki tego gazu, z uwzględnieniem wzajemnych oddziaływań międzycząsteczkowych) oraz ciśnienia kohezijnego gazu rzeczywistego. Pokazana na rys. 1.2 izoterma *van der Waalsa* odnosi się do przebiegu w zakresie poniżej punktu krytycznego Kr . Wykres izotermy $T_{kr} = const$ ma punkt przegięcia w stanie krytycznym Kr , natomiast izoterma w zakresie $T > T_{kr}$ ma przebieg monotoniczny.

Analizując przebieg izotermy w obszarze $T < T_{kr}$ (rys. 1) trzeba brać pod uwagę i oddzielnie rozpatrywać poszczególne „odcinki izotermy” [13]. Załóżmy, że w stanie wyjściowym znajduje się pod tłokiem w cylindrze 1 kg gazu rzeczywistego (np. czynnika roboczego) w stanie pary przegrzanej. Proces izotermicznego sprężania prowadzony jest dostatecznie wolno tak, że na odcinku $F-E$ proces rzeczywisty realizowany

jest według izotermy *van der Waalsa*. Począwszy jednak od stanu E proces sprężania rzeczywistego przebiega inaczej, niż izoterma *van der Waalsa* $E-D-C-B-A$, to znaczy według odcinka linii prostej $E-A$ (na rys. 1). W stanie E czynnik osiąga ciśnienie nasycenia p_s . Izobara $p_s(T)$, wyznaczająca ciśnienie nasycenia, odpowiadające temperaturze nasycenia $T=T_s$ przebiega na wykresie w układzie współrzędnych $p-v$ tak, że zakreskowane pola powierzchni są sobie równe – jest to zgodne z konstrukcją tzw. prostej *Maxwella*. Osiągnięcie stanu $E[p_s(T), v'']$ jest równoznaczne z osiągnięciem teoretycznego stanu początkowego skraplania właściwego. W zakresie między stanami E i A występuje jednoskładnikowy ośrodek dwufazowy w postaci mieszaniny cieczy i jej pary. Po osiągnięciu stanu A następuje wejście w obszar stanów cieczy przechłodzonej w warunkach równowagi stabilnej (na lewo od linii granicznej $x = 0$). Na rys. 1 wyeksponowano poza tym obszar cieczy przegrzanej oraz pary przechłodzonej. Będą one bardzo przydatne w dalszej analizie niestabilności omawianych procesów fazowych.

3. Klasyfikacja niestabilności w przepływie dwufazowym

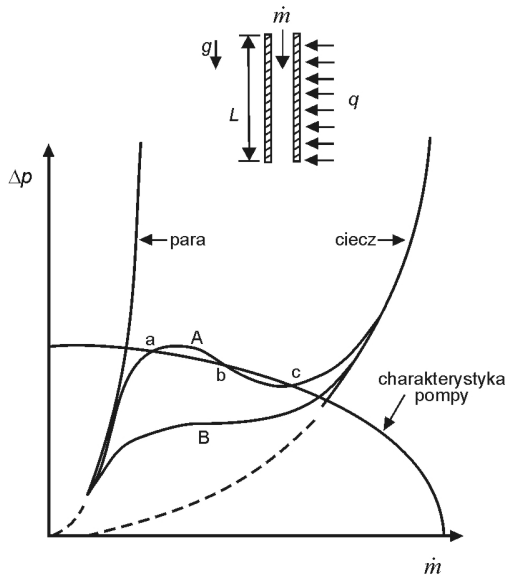
Niestabilności przepływu dwufazowego można, ogólnie biorąc, podzielić na dwie kategorie. Uważa się, że przepływ jest niestabilny statycznie, jeśli źródło niestabilności jest nieodłącznie związane z parametrami stanu ustalonego układu. Z uwagi na to, że niestabilność jest konsekwencją zmiany wartości parametru stanu ustalonego układu, to oczekuje się, że początek niestabilności może zostać przewidziany na podstawie jedynie znajomości tego stanu ustalonego. Statyczna niestabilność prowadzi najczęściej do innego punktu działania tego układu w stanie ustalonym, albo okresowej oscylacji w jego zachowaniu. Jako przykład **niestabilności statycznych** można wymienić niestabilności pierwszego kryzysu wrzenia oraz tak zwaną niestabilność *Ledineggo* [15]. Niestabilność pierwszego kryzysu wrzenia występuje w przypadku zmiany mechanizmu wymiany ciepła podczas wrzenia w objętości. Przy krytycznej wartości strumienia ciepła na ogrzewanej powierzchni wrzenie pęcherzykowe zostaje zastąpione wrzeniem błonowym.

Niestabilność Ledineggo objawia się spadkiem ciśnienia stanowiącym odpowiedź układu na opory przepływu, związane z przepływem dwufazowym. Na rys. 2 przedstawiono przypadek ich występowania.

Niestabilność *Ledinego* może wystąpić w określonym stanie układu, gdy całkowity spadek ciśnienia (będący sumą tarcowego, przyspieszeniowego i grawitacyjnego spadku ciśnienia) zmniejsza się ze wzrostem natężenia przepływu. Rys 2 przedstawia zależność oporów przepływu Δp od strumienia masy \dot{m} dla przechłodzonego wrzenia cieczy w rurce o długości L , w przepływie opadającym (kierunek z góry do dołu). Na wykresie przedstawiono również charakterystykę pompy dostarczającej czynnik do instalacji. Na przecięciu charakterystyki oporów przepływu i charakterystyki pompy uzyskuje się punkt współpracy, który określa parametry przepływu w instalacji. Jeżeli do kanału doprowadzana jest ciecz, o temperaturze niższej od temperatury nasycenia, to przy bardzo wysokich natężeniach przepływu, następuje w kanale przepływ jednorodny cieczy. Spadek ciśnienia Δp odpowiada wówczas przepływowi cieczy i leży na krzywej cieczy, co pokazano na rys. 2. Jeżeli jednak nastąpi spadek natężenia przepływu cieczy, wtedy rozpocznie się proces wrzenia i punkt współpracy pompy z instalacją przesunie się w obszar przepływu dwufazowego. Przy bardzo niskich natężeniach przepływu punkt współpracy znajduje się praktycznie na krzywej przepływu pary suchej, ponieważ parowanie cieczy występuje prawie natychmiast, przy wlocie czynnika do kanału i dalszy przepływ dotyczy tylko fazy gazowej.

Krzywa opisana równaniem $\Delta p = f(\dot{m})$ może przebiegać albo według linii *A*, albo *B* (rys. 2). Linia *A* przecina charakterystykę pompy w więcej niż jednym punkcie (rys. 2 – trzy punkty przecięcia). Nachylenie charakterystyki przepływu w kanale jest dodatnie (funkcja rosnąca) w punktach *a* i *c* oraz ujemne (funkcja malejąca) w punkcie *b*. W miejscu, gdzie nachylenie krzywej przepływu jest bardziej ujemne, niż krzywej charakterystyki pompy, punkt współpracy pompy i instalacji jest niestabilny. Zakłócenie, które zwiększa natężenie przepływu w stanie opisanym punktem *b*, zmniejsza jednocześnie opory przepływu w instalacji Δp , co skutkuje, że przyrost ciśnienia pomiędzy króćcem tłocznym i ssawnym pompy jest mniejszy. Powoduje to zwiększenie natężenia przepływu czynnika, a to z kolei dalszy spadek Δp . Wzrost natężenia przepływu czynnika będzie następował do momentu, aż nachylenie krzywej oporów przepływu stanie się dodatnie, a skutkiem tego będzie sprowadzenia punktu współpracy do stanu *c*. Podobnie można wykazać, że zaburzenie, które zmniejsza masową wydajność w punkcie *b* spowoduje przesunięcie punktu współpracy pompy z instalacją do stanu *a*.

Punkty a i c są stanami stabilnymi, ponieważ zmiany spadku ciśnienia związane są z małymi zaburzeniami wydajności masowej. Ich oddziaływanie pozwala na powrót układu do pierwotnego stanu współpracy. Układ może istnieć jako stabilny w stanie a lub c . Wystarczająco duże zaburzenia mogą spowodować, że punkt pracy układu przesunie się z jednego stanu do drugiego. Zdolność układu do takiego przejścia pomiędzy stanami, przy dostatecznie dużym zaburzeniu, jest charakterystyczną cechą niestabilności *Ledineggo*. Dodanie zaworu regulującego przepływ w górę w kanale jest prostym sposobem zmiany spadku ciśnienia i uniknięcia niestabilności *Ledineggo*. Szczegółową analizę niestabilności wywołanych niejednoznacznością charakterystyki hydraulicznej przepływu podano w pracy *Mikielewicza* [22]. Stwierdza on, że warunkiem koniecznym stabilności przepływu w kanale jest jednoznaczność charakterystyki hydraulicznej kanału, w którym odparowuje czynnik (np. $\Delta p = f(w\rho)$, przy stałym $\dot{Q} = const$, gdzie \dot{Q} jest strumieniem ciepła na ścianie kanału).



Rys. 2. Charakterystyka współpracy pompy i instalacji z wrzącym czynnikiem w kanale pionowym [15]

Fig. 2. Characteristics of the cooperation of pump and system with boiling refrigerant in vertical channel [15]

W przypadku, gdy główną przyczyną zakłóceń układu są oddziaływania cieplne lub hydrodynamiczne, dające wyraźne efekty inercyjne, wówczas przepływ jest niestabilny, zależny od tak zwanych **niestabilności dynamicznych**. W tych przypadkach zaburzenia przepływu w ośrodku dwufazowym typu ciec-z-gaz mogą być przenoszone na drodze dwóch mechanizmów, jako fale akustyczne (niestabilności ciśnieniowe) lub jako fale zmiany gęstości strumienia masy (będące skutkiem wahań stopnia zapełnienia). Są to zjawiska typu falowego, ale prędkości propagacji fali w tych dwóch przypadkach są bardzo różne. Fale akustyczne charakteryzowane są przez częstotliwości o dużej wartości, podczas gdy oscylacje fali zmiany gęstości strumienia masy mają zwykle dużo niższą częstotliwość.

Niestabilności akustyczne są wynikiem przemieszczania się fali ciśnieniowej w przepływie dwufazowym. Oscylacje akustyczne mogą wystąpić podczas wrzenia przechłodzonego oraz przy rozwiniętym wrzeniu w przepływie, pod warunkiem osiągnięcia krytycznego strumienia ciepła i przejścia układu do wrzenia błonowego. Według badań *Berglesa* [3] oscylacje akustyczne mają mały wpływ na przebieg przepływu. Amplituda akustycznych wahań ciśnienia może być duża, w porównaniu do średniej wartości częstotliwości przemieszczania się zaburzeń w ośrodkach dwufazowych. Podczas badań eksperymentalnych zarejestrowano częstotliwości oscylacji tego typu w zakresie $10 \div 10\,000$ Hz.

Prędkość fali zmiany gęstości strumienia masy jest stosunkowo mała, gdyż wymagany jest określony czas, aby cząsteczki płynu mogły przemieścić się w kanale. Fale tego typu są najczęściej obserwowane podczas procesów wrzenia w przepływie, kiedy do kanału dopływa ciecz niedogrzana do temperatury nasycenia (wrzenie przechłodzone). Oscylacje te są bezpośrednią konsekwencją zależności między procesem wrzenia i własnościami przepływu dwufazowego. Chwilowy spadek wydajności przepływu na dopływie skutkuje wzrostem entalpii właściwej płynu w tym obszarze. Wyższa wartość entalpii w części przepływu przechłodzonego powoduje lokalny wzrost temperatury czynnika. Obniża to wartość niedogrzenia cieczy do temperatury nasycenia i przesuwa punkt początku wrzenia w kierunku przeciwnym do przepływu czynnika. Od momentu rozpoczęcia wrzenia w przepływie wzrasta lokalny stopień zapełnia i stopień suchości pary w kanale.

Lokalny wzrost stopnia suchości pary i stopnia zapełnienia skutkuje zaburzeniem grubości cienkiej warstwy filmu cieczy na ścianie ka-

nału. Może to wywołać zmianę struktury przepływu z pęcherzykowej na pierścieniową, co chwilowo zwiększa tempo parowania, a to kolei doprowadza do ponownego przyśpieszenia przepływu. Wzrasta miejscowy gradient ciśnienia, prowadzący do zwiększenia spadku ciśnienia całkowitego podczas przepływu dwufazowego w kanale. Małe wahania natężenia przepływu mogą ulegać wzmocnieniu, aż do uzyskania określonej amplitudy fali zmiany gęstości strumienia masy. Potwierdzają to badania eksperymentalne, które dokumentują charakterystyczne cechy oscylacji fali zmiany gęstości strumienia masy. Wykazały one, że oscylacje fali zmiany gęstości strumienia masy są silnie zależne od zmian gęstości strumienia ciepła, stopnia zmniejszenia przekroju poprzecznego kanału na dopływie i wypływie czynnika, jednofazowego i dwufazowego tarcowego spadku ciśnienia w kanale, przechłodzenia i natężenia przepływu czynnika oraz zmiany ciśnienia w układzie [13, 24].

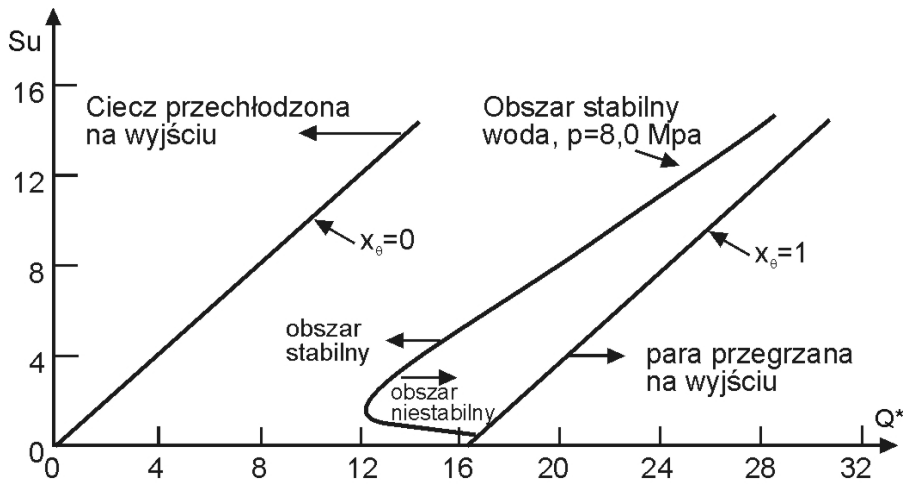
Wiele prac [3, 13] dotyczy badań stateczności wrzenia w przepływie dwufazowym w zakresie oscylacji fali zmiany gęstości strumienia masy. Należy zauważyć, że proponowane są bezwymiarowe kryteria do określenia obszarów występowania niestabilności tego typu. Na rys. 3 przedstawiono opracowaną przez *Ishii* i *Zubera* [15] mapę stateczności. Przewidywane warunki stateczności przedstawiono w układzie współrzędnych opisujących przechłodzenie czynnika, ujęte liczbą kryterialną Su (*subcooling number*) oraz bezwymiarowym strumieniem ciepła Q^* i zdefiniowane jako:

$$Su = \frac{c'_p (T_S - T_{F1})}{r} \cdot \left(\frac{\rho' - \rho''}{\rho'} \right), \quad (2)$$

$$Q^* = \frac{4 \cdot q'' \cdot L}{d_h \cdot \left(\frac{w\rho}{\rho'} \right) \cdot r} \cdot \left(\frac{\rho' - \rho''}{\rho' \cdot \rho''} \right). \quad (3)$$

Z rys. 3 wynika, że wzrost strumienia ciepła, przy określonym przechłodzeniu czynnika i jego natężeniu przepływu, może powodować zmianę charakteru przepływu ze stabilnego na niestabilny. Spadek natężenia przepływu, przy ustalonym strumieniu ciepła i przechłodzeniu czynnika na dopływie do układu może wywołać, że powstanie przepływ niestabilny. Jak wynika z badań eksperymentalnych, tarczyowy spadek

ciśnienia w obszarze cieczy ma stabilizujący wpływ na charakter przepływu, ponieważ występuje on w części początkowej kanału i wywołuje efekt tłumienia oscylacji. Dodając ograniczenia przepływu przy wlocie czynnika do kanału można zmniejszyć niestabilności wywołane w postaci fal gęstości strumienia masy.



Rys. 3. Mapa stateczności opracowana przez Ishii i Zuber [15]
 Fig. 3. Map of stability developed by Ishii and Zuber [15]

4. Falowy charakter niestabilności w ośrodkach dwufazowych

Dotychczasowe badania eksperymentalne oraz analizy teoretyczne dowodzą, że ośrodki wielofazowe, a szczególnie dwufazowe wykazują bardzo interesujące właściwości falowe. Zainteresowanie to ma zarówno charakter poznawczy, jak i aplikacyjny, bowiem dotyczy w sposób bezpośredni lub pośredni powstawania niepożądanych oddziaływań na czynnik znajdujący się w obiegach maszyn energetycznych. Z drugiej strony poznanie właściwości falowych ośrodków wielofazowych pozwala na opis transportu energii, ciepła i pędu w tego typu ośrodkach. Prezentacja różnych poglądów, dotyczących falowego charakteru niestabilności w ośrodkach wielofazowych wymaga uporządkowania pojęć i obecnego stanu wiedzy w tym zakresie.

Niektóre podstawowe pojęcia związane z charakterem falowym zjawisk mają swoje odniesienie zarówno do czynników jednofazowych, jak i wielofazowych. Pod pojęciem „fala” należy tu rozumieć, w sensie fizycznym, zaburzenie rozprzestrzeniające się w danym ośrodku, ogólnie – w przestrzeni, przy czym towarzyszy temu zjawisku transport energii, zachodzący nawet wtedy, gdy nie występuje transport materii. Pojęcie „fala” w rozumieniu matematyki jest to dowolna funkcja różniczkowalna, która spełnia tzw. równanie falowe. W sensie rozważań podstawowych wykorzystuje się kojarzenie podanych określeń, w wyniku czego otrzymuje się nie tylko jakościowy, ale również ilościowy opis problemu falowego.

Poziomem odniesienia w analizie właściwości falowych ośrodków wielofazowych są podstawy ruchu falowego ośrodka jednofazowego sformułowane w gazodynamice, stanowiącej dział mechaniki płynów. Wynika stąd istotne, porównawcze zagadnienie przenoszenia zaburzeń ze skończoną prędkością w płynie ściśliwym. Właściwość nazywana „ściśliwością” płynu oznacza bowiem podatność materii na zmiany objętości, odpowiadające wywołanym zmianom ciśnienia.

Typowym przykładem rozprzestrzeniania się małych zaburzeń jest dźwięk, zatem analiza tego problemu stanowi treść działu akustyki. Płyn ściśliwy odpowiada na dodatni przyrost ciśnienia dodatnią zmianą gęstości, co wynika ze wzoru:

$$c^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s, \quad (4)$$

gdzie: c jest prędkością dźwięku, natomiast $\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s$ parametrem charakte-

ryzującym ściśliwość płynu, ρ – gęstością, zaś p ciśnieniem. W analizie ruchu falowego w ośrodku jednofazowym występuje znaczne uproszczenie polegające na tym, że układ równań zachowania: masy, energii i pędu sprowadza się do hiperbolicznego równania falowego cząstkowego, zwanego równaniem falowym. Przykładowo dla fali sprężystej (przemieszczanie mechaniczne elementów ośrodka) otrzymuje się:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - v^2 \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0. \quad (5)$$

Jest to postać równania falowego opisującego zmianę ciśnienia oraz charakterystyczną prędkość, przy której następuje tzw. „zadławienie przepływu” [10]. Dla przepływu w ośrodku jednofazowym jest ona równa prędkości dźwięku c (4). Prędkość rozprzestrzeniania się zaburzeń w ośrodku jednofazowym jest z reguły niezależna od długości fali. W ośrodku wielofazowym nie jest ona równoważna prędkości dźwięku. Tutaj należy upatrywać zmiany w podejściu do analizy ruchu falowego w tych ośrodkach. W gazodynamice – dla układu ściśliwego jednofazowego pomija się zwykle efekt nieodwracalności procesu, wynikający z zapisu $\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s$ w równaniu (4), gdzie indeks s oznacza stałą wartość entropii. Uwzględnienie tych efektów w ośrodkach wielofazowych jest zagadnieniem fundamentalnym.

Według autora pracy [10] pojawia się bardzo istotna różnica w interpretacji parametrów przepływu „zadławionego”, związanego z propagacją zaburzeń. W przypadku przepływu jednofazowego (równowagowego) prędkość dźwięku w tym ośrodku jest związana z zaburzeniem wywołanym zmianą ciśnienia. Podkreśla się, że w ośrodkach wielofazowych występuje zwykle kombinacja wielu wielkości termodynamicznych (nie tylko ciśnienia), które określają wielkość prędkości dźwięku w tych ośrodkach.

W aktualnym stanie wiedzy o niestabilnościach ruchu falowego w ośrodkach wielofazowych można wskazać podstawowe odstępstwa od wyników analizy dla układów jednofazowych. Najpoważniejszą z nich jest nieodwracalność procesów, wyrażająca się w dwóch aspektach, to znaczy:

- oddziaływaniem dyssypacyjnym,
- właściwościami dyspersyjnymi.

W rozumieniu termodynamiki klasycznej [4, 5] oddziaływanie dyssypacyjne związane jest ze zmianą charakteru przekazywania energii. Jeżeli przyjmie się, że energia może być przekazywana dwoma sposobami, to znaczy przez pracę lub przez ciepło, to pod pojęciem transportu dyssypatywnego energii należy rozumieć ogólnie przekaz energii przez pracę, mający równocześnie znamiona przekazu przez ciepło (stąd można zapisać, że elementarne ciepło tarcia dq_f jest równe liczbowo pracy tarcia

dw_f). Zwykle dyssypacja energii rozumiana jest jako tzw. rozpraszanie energii, natomiast procesy dyssypatywne są związane ze zjawiskiem molekularnego wyrównywania pędu, ciepła i stężenia [1, 2, 8]. Zjawiska dyssypatywne są typowymi zjawiskami nieodwracalnymi, które prowadzą do „produkcji entropii” w układzie (przyrost entropii). W przypadku ośrodków wielofazowych związane jest to również z tłumieniem rozprzestrzeniania się zaburzeń w tych ośrodkach.

Drugie nieodwracalne oddziaływanie określone pojęciem „dispersyjności” uwzględnia fakt, że prędkość przemieszczania się zaburzeń zależy od ich częstotliwości. To stanowi bezpośrednią przyczynę, że nie można układów równań zachowania dla ośrodków wielofazowych sprowadzić do jednego równania falowego [10].

Dla przepływów dwufazowych można zestawić charakterystyczne właściwości falowe, wyróżniając takie cechy, jak [23]:

1. prędkość rozchodzenia się zaburzeń w ośrodku dwufazowym jest niższa, od prędkości przemieszczania tych zaburzeń w poszczególnych, oddzielnych składnikach ośrodka dwufazowego;
2. istnieje wyraźna zależność prędkości rozchodzenia się zaburzeń, od udziału objętościowego obu faz;
3. występuje silna zależność prędkości rozchodzenia się zaburzeń, od ich częstotliwości;
4. wobec znaczącego wpływu dyssypacji energii nie występują w ośrodkach dwufazowych klasyczne formy stacjonarnej fali uderzeniowej, charakterystyczne dla ośrodków jednofazowych;
5. w ośrodkach dwufazowych mają miejsce zjawiska falowe związane z występowaniem ujemnego ciśnienia hydrodynamicznego, na przykład podczas gwałtownej ekspansji pary przegrzanej;
6. istnieje możliwość wystąpienia tzw. *przepływu pseudokrytycznego*, który nie może być zrealizowany w układzie jednofazowym [7].

Niektóre z wymienianych wyżej właściwości falowych mogą także pojawiać się w ośrodkach trój- i wielofazowych. Podane odstępstwa, spowodowane właściwościami falowymi ośrodków dwufazowych utrudniają w znacznym stopniu analizę zjawisk falowych, związanych lub towarzyszących przemianom fazowym czynników energetycznych. Na podkreślenie zasługuje fakt, że charakterystyczne zjawiska falowe, które występują w układach dwufazowych pojawiają się za przyczyną nierów-

nowagi termodynamicznej występującej w otoczeniu powierzchni międzyfazowej. Powierzchnia ta stanowi granicę między fazami, po przekroczeniu której zmienia się skokowo stan fizyczny mieszaniny – ośrodka dwufazowego. Uwzględnić trzeba, że w przepływach dwufazowych granica rozdziału faz formuje się i zmienia podczas ruchu, zaś w przypadku przepływu jednofazowego granica ta ma charakter stały.

W analizach przepływów wielofazowych bierze się pod uwagę przyczyny i skutki procesu nieodwracalnego. Autor [6] podkreśla, że nieodwracalny proces przepływu masy, ciepła i pędu wywołany jest istnieniem niezrównoważonych „sił termodynamicznych” (np. w postaci gradientu ciśnienia, temperatury itp.) i dąży w kierunku osiągnięcia stanu równowagi trwałej (w tym stanie siły zostaną zredukowane do zera). Szczegółowa analiza zjawisk nieodwracalnych uwzględnić powinna wzajemne sprzężenie tych sił. Termodynamika procesów nierównowagowych ujmuje te zagadnienia [9]. Problemy nierównowagi termodynamicznej ujawniają się zwłaszcza wtedy, gdy czas realizacji danego procesu jest porównywalny z czasem relaksacji (czyli czasem dojścia układu w stanie nierównowagowym do stanu równowagi). Właściwości ośrodka dwufazowego zależą bardzo silnie od nierównowagi termodynamicznej, co wyróżnia je od ośrodków jednofazowych, w których czas trwania procesu jest znacznie dłuższy od czasu relaksacji, a analizę można prowadzić w warunkach równowagowych.

Wyniki systematycznych badań w zakresie dynamicznych niestabilności podczas wrzenia w kanale pionowym przedstawiono w pracy *Stenninga* [25]. Badaniu poddano trzy typy niestabilności, to znaczy: cieplne (związane ze zmianami temperatury ogrzewanej ścianki kanału), ciśnieniowe oraz wywołane zmianą gęstości strumienia masy. Podobne wyniki badań niestabilności cieplnych przedstawili *Mayinger* i *Kastner* [21] oraz *Kakaç et al.* [18].

W pracy [19] zaprezentowano badania przepływu dwufazowego w wytwornicy pary wodnej, prowadzące do określenia zależności między strumieniem ciepła oraz wydajnością masową w warunkach oddziaływań niestabilnych typu cieplnego i zmiany gęstości strumienia masy. Autorzy [19] opracowali model teoretyczny pozwalający obliczyć parametry niestabilności o charakterze falowym (w tym okres i amplitudę zaburzeń). Użytkowano dobrą zgodność obliczeń z wynikami badań eksperymentalnych.

Wśród publikacji można także wymienić interesujące opracowanie [14], w którym podano wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych w zakresie niestabilności wywołanych zmianą gęstości strumienia masy podczas wrzenia w równoległych poziomych kanałach dla czynnika pod wysokim ciśnieniem.

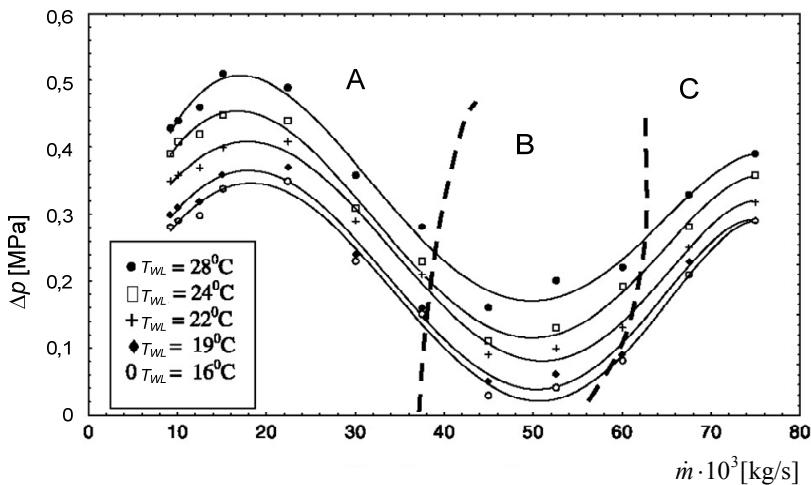
Wskazując na rosnące w ostatnich latach zainteresowanie badaniami niestabilności podczas przemian fazowych w przepływie w kanałach można wymienić następujące charakterystyczne formy niestabilności falowych spotykane w ośrodkach dwufazowych:

1. związane ze zmianą gęstości strumienia masy,
2. temperaturowe,
3. ciśnieniowe,
4. związane ze zmianą składu faz,
5. dotyczące początku przemiany fazowej,
6. w postaci fali uderzeniowej,
7. ujawniające się w postaci interferencji fal powierzchniowych,
8. niestabilności *Kelvina-Helmholtza* itp.

5. Niestabilności związane ze zmianą strumienia masy

Interesujące wyniki badań dotyczących tego typu niestabilności podają w swojej pracy *Karsli S. et al.* [20]. Badania przeprowadzono dla przepływu czynnika R11 w kanale rurowym o przekroju kołowym, w którym powierzchnię wewnętrzną odpowiednio rozwinięto, w celu zwiększenia intensywności wymiany ciepła (wprowadzono różnego rodzaju ożebrowanie). Na końcu kanału pomiarowego znajdowało się przewężenie o wartości $\beta = d_p/d_w = 0,448$, gdzie: d_p – średnica wewnętrzna przewężenia, d_w – średnica wewnętrzna kanału. Badania eksperymentalne przeprowadzono dla następujących parametrów czynnika: ciśnienie $p = 0,75$ MPa, strumień masy $\dot{m} = 0 \div 0,009$ kg/s, przechłodzenie na dopływie czynnika do kanału pomiarowego $\Delta T_S = 16, 19, 22, 24$ i 28K, strumień ciepła $\dot{Q} = 16$ kW. W tych warunkach czynnik przepływał w kanale w postaci cieczy. Następnie quasistatycznie obniżano strumień masy czynnika. Powodowało to dodatkowy wzrost jego temperatury wzdłuż drogi przepływu. Następował również spadek oporów przepływu. Po osiągnięciu sprzyjających warunków rozpoczynał się proces wrzenia na końcu kanału, którego front przemieszczał się wzdłuż kanału

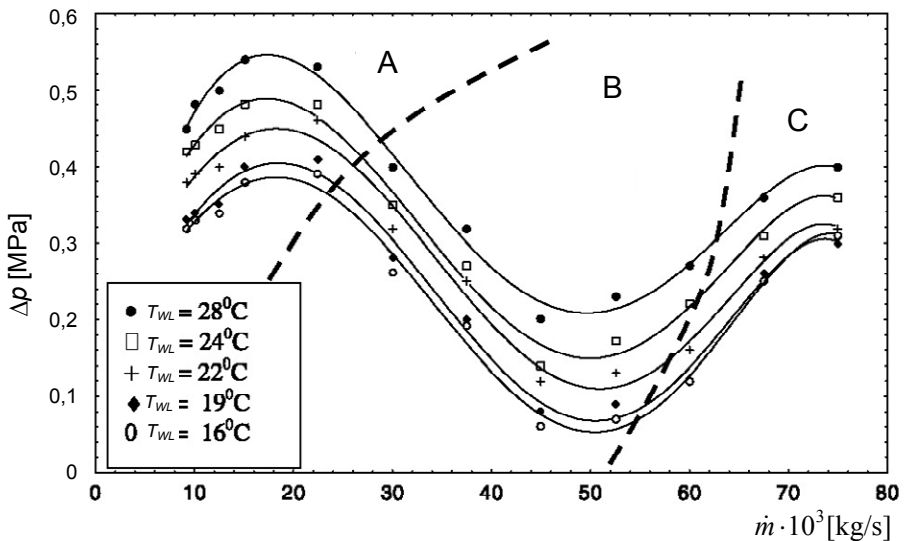
pomiarowego, w kierunku przeciwnym do przepływu czynnika. Pojawienie się w kanale mieszaniny dwufazowej wywoływało wzrost oporów przepływu. Pomimo spadku strumienia masy wzrastały opory przepływu. Gdy punkt rozpoczęcia wrzenia przesunął się poza kanał pomiarowy (do podgrzewacza wstępnego czynnika) opory przepływu ponownie ulegały zmniejszeniu, przy jednoczesnym spadku strumienia masy. W ostatnim przypadku, w kanale pomiarowym przepływała praktycznie tylko faza gazowa. Na rys. 4 pokazano przykładowo wyniki badań dla rury gładkiej, a na rys. 5 dla rury wewnątrznie nagwintowanej (ze skokiem gwintu 3,6 mm). W obu przypadkach liniami kreskowymi zaznaczono obszar, w którym występują niestabilności w postaci spadku ciśnienia (*Pressure-Drop Oscillations – p.d.o.*) i falowej zmiany gęstości (*Density-Wave Oscillation d.w.o.*). Dla mniejszych wartości strumienia masy występowały tylko niestabilności związane ze zmianą gęstości (*d.w.o.*).



Rys. 4. Zależność spadku ciśnienia od strumienia masy podczas wrzenia czynnika R11 w przepływie w poziomej rurze gładkiej w stanie ustalonym [20]

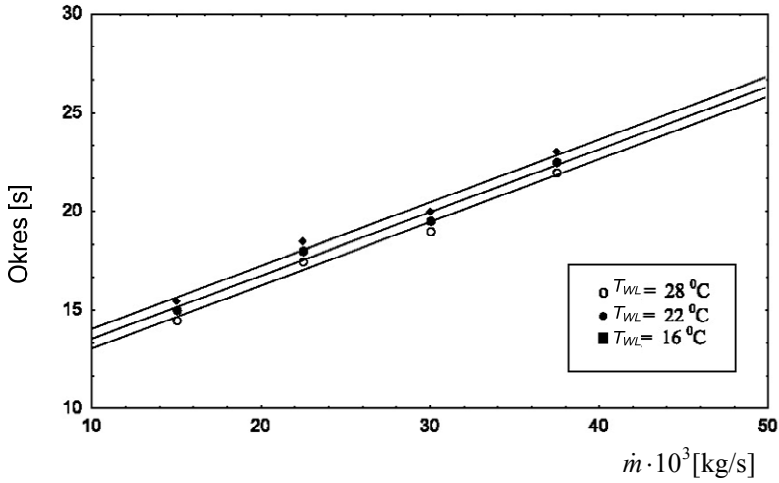
Fig. 4. Dependence of pressure drop from mass flux during boiling of R11 refrigerant in flow in horizontal smooth pipe in stationary state [20]

Badania zrealizowano dla różnych wartości stopnia przechłodzenia czynnika. Stwierdzono, że w obszarach stanów niestabilnych obserwuje się zmiany parametrów przepływu dwufazowego. Zmieniał się strumień masy czynnika, jego ciśnienie i temperatura ogrzewanej ścianki. Amplituda i okres oscylacji były zależne od rodzaju rozwinięcia wewnętrznej powierzchni wymiany ciepła oraz od strumienia masy czynnika. Najniższe ich wartości obserwowano dla rury gładkiej. Ze wzrostem stopnia ożebrowania wzrastały także okres i amplituda oscylacji. Na rys. 6 pokazano przykładowo zależność okresu oscylacji ciśnienia wlotowego czynnika, a na rys. 7 zależność amplitudy ciśnienia od strumienia masy czynnika R11.



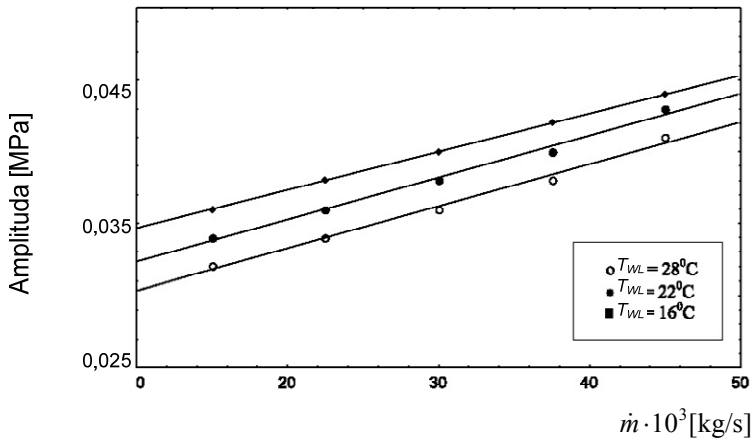
Rys. 5. Zależność spadku ciśnienia od strumienia masy podczas wrzenia czynnika R11 w przepływie w poziomej rurze wewnętrznie ożebrowanej w stanie ustalonym [20]

Fig. 5. Dependence of pressure drop from mass flux during boiling of R11 refrigerant in flow in horizontal gilled pipe in stationary state [20]



Rys. 6. Zależność okresu niestabilności falowych od strumienia masy dla badanych wartości temperatury na dopływie czynnika do kanału [16]

Fig. 6. Dependence of period of wave instabilities from mass flux for examined temperature values on refrigerant inlet to channel [16]



Rys. 7. Zależność amplitudy niestabilności falowych od strumienia masy czynnika dla badanych typów kanałów rurowych [16]

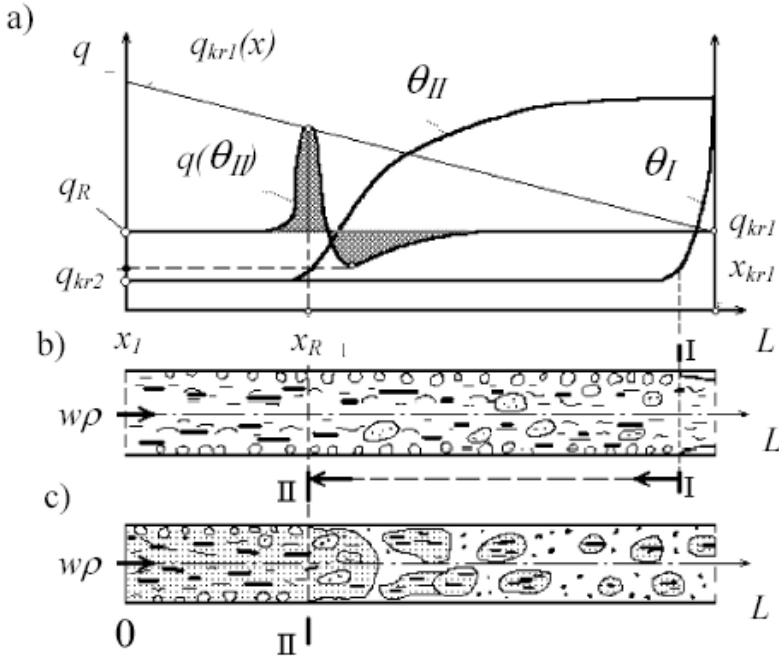
Fig. 7. Dependence of amplitude of wave instabilities from refrigerant's mass flux for examined types of tubular channels [16]

6. Falowe niestabilności temperaturowe

Falowe niestabilności cieplne wynikają zwykle ze zmiany temperatury ogrzewanej ścianki kanału lub przepływającej mieszaniny dwufazowej. Towarzyszą one zmianie mechanizmu transportu ciepła w ośrodku dwufazowym. Mają również związek ze zmianą struktury płynu, będącego w bezpośrednim kontakcie z powierzchnią wymiany ciepła. Warunki takie mogą występować podczas rozpoczęcia lub zakończenia przemiany fazowej wrzenia lub skraplania, którym towarzyszy przejście frontu wrzenia lub skraplania, a także być następstwem zmiany rodzaju przemiany fazowej, np. podczas pierwszego lub drugiego kryzysu wrzenia, kiedy wrzenie pęcherzykowe zostaje zastąpione wrzeniem błonowym lub odwrotnie. Takie oscylacje temperatury ogrzewanej ścianki wymiennika występują także podczas wrzenia przejściowego, kiedy wrząca ciecz lub para nasycona mają okresowo kontakt z powierzchnią wymiany ciepła. Oscylacje temperatury są bardzo niebezpieczne w eksploatacji, bowiem mogą wywołać impulsową zmianę ciśnienia rzędu $0,34 \div 0,68$ MPa i temperatury do 300K (woda). Przyczyną niestabilności cieplnych mogą być falowe niestabilności strumienia masy w układzie.

W pracy [17] przedstawiono wyniki badań takich niestabilności temperaturowych podczas wrzenia przejściowego wody w objętości i podczas przepływu. Badano wymianę ciepła przy wrzeniu w objętości na powierzchni poziomego walca zanurzonego w wodzie, w zakresie ciśnienia $p = 3 \div 10$ MPa. Podczas wrzenia w zakresie przejściowym, gdy wrzenie pęcherzykowe odbywało się na części powierzchni walca, pozostałą część obejmowało wrzenie błonowe. Zaobserwowano zamianę wrzenia pęcherzykowego na wrzenie błonowe i odwrotnie. Odbywało to się w postaci *fali pelzającej* na powierzchni walca. Zmiana ustroju wrzenia powodowała zmianę temperatury i gęstości strumienia ciepła na ogrzewanej powierzchni. Jeżeli wrzenie pęcherzykowe było zastępowane wrzeniem błonowym, wówczas następował wzrost temperatury powierzchni i spadek gęstości strumienia ciepła. Można powiedzieć, że przemieszczała się po powierzchni fala wzrostu temperatury – zwana umownie „falą gorącą”. Jeżeli wrzenie błonowe było zastępowane wrzeniem pęcherzykowym, wtedy następował spadek temperatury ogrzewanej powierzchni i wzrost strumienia ciepła. Przemieszczała się tak zwana fala spadku temperatury – zwana „falą zimną”.

Przemieszczanie się fali temperaturowej podczas wrzenia w przepływie jest zjawiskiem bardzo złożonym. W tym przypadku przejście fali temperaturowej jest sprzężone ze zmianą ustroju wrzenia i może ono towarzyszyć rozpoczęciu wrzenia pęcherzykowego w przepływającej cieczy lub rozpoczęciu wrzenia błonowego podczas pierwszego kryzysu wrzenia. Na rys. 8 przedstawiono interpretację graficzną modelowego przejścia fali temperaturowej w kanale rurowym, do którego doprowadzano wodę przechłodzoną [17]. Badania wykonano w stanie zbliżonym do quasistatycznego, zwiększając gęstość strumienia ciepła na ogrzewanej ścianie kanału q_w do momentu wywołania fali temperaturowej. Wraz ze wzrostem gęstości strumienia ciepła q_w następował rozwój wrzenia pęcherzykowego w kanale. Po osiągnięciu sprzyjających warunków (q_{kr1}) rozpoczął się na końcu kanału proces tworzenia błony parowej na wewnętrznej ścianie kanału. Powodowało to spadek intensywności wymiany ciepła i gwałtowny wzrost temperatury ogrzewanej ścianki θ_l ($\theta_l = T_w - T_s$) – przekrój I – I (na rys. 8b). Następnie błona parowa przesuwiała się wzdłuż kanału w kierunku przeciwnym do przepływu wrzącego czynnika. Towarzyszył temu wzrost temperatury ścianki kanału θ_{II} . Front fali temperaturowej pokazano w przekroju II – II (na rys. 8c). Podano również wielkości gęstości strumieni krytycznych q_{kr1} i q_{kr2} oraz gęstości strumienia ciepła równowagowego q_R (rys. 3.11a). Proces przejścia fali odbywał się do momentu, gdy ilość ciepła dostarczanego do ogrzewanego kanału rurowego była równa ilości ciepła odbieranego przez wrzący czynnik. Można powiedzieć, że wtedy fala jak gdyby „zatrzymywała się”, a oba ustroje wrzenia były w swego rodzaju „równowadze”. Dalsze podwyższenie gęstości strumienia ciepła q_w na ogrzewanej ścianie powodowało kontynuację przesuwania się fali temperaturowej.



Rys. 8. Model przejścia fali temperaturowej w kanale rurowym [17]; a) profile temperatury ścianki kanału (θ_I , θ_{II}) oraz zmiana lokalnej gęstości strumienia ciepła $q(\theta)$, b) interpretacja graficzna początku wrzenia błonowego na wypływie czynnika z ogrzewanego kanału, c) stan równowagi pomiędzy wrzeniem pęcherzykowym i błonowym w kanale, x – stopień suchości pary

Fig. 8. Model of temperature wave passage in tubular channel [17]; profiles of channel wall temperature (θ_I , θ_{II}) and change of local heat flux density $q(\theta)$, b) graphical interpretation of start of film boiling on refrigerant's outflow from heated channel, c) equilibrium state between bubble boiling and film boiling in channel x : vapour dryness level

7. Falowe niestabilności ciśnieniowe

Niestabilności w postaci przemieszczania się fali ciśnieniowej (oscylacje typu „spadek ciśnienia”) występują w ośrodkach ściśliwych. Oznacza to, że mogą występować w ośrodkach dwufazowych typu ciecz-gaz, szczególnie podczas przepływu czynnika w kanale. Mogą one prze-

mieszcząc się zarówno „w górę przepływu”, jak również zgodnie z kierunkiem przepływu czynnika. W takim ośrodku ma miejsce zjawisko polegające na tym, że podstawowa niestabilność statyczna wywołuje niestabilność dynamiczną, którą cechują oscylacje ciśnienia o niskiej częstotliwości. Okres oscylacji spadku ciśnienia zmienia się od 18 do 70 s i jest określony stałą czasową, zależną od objętości instalacji i ściśliwości przepływającej mieszaniny dwufazowej. Okresy oscylacji fali ciśnieniowej są zazwyczaj wyższe, od oscylacji gęstości strumienia masy w kanale.

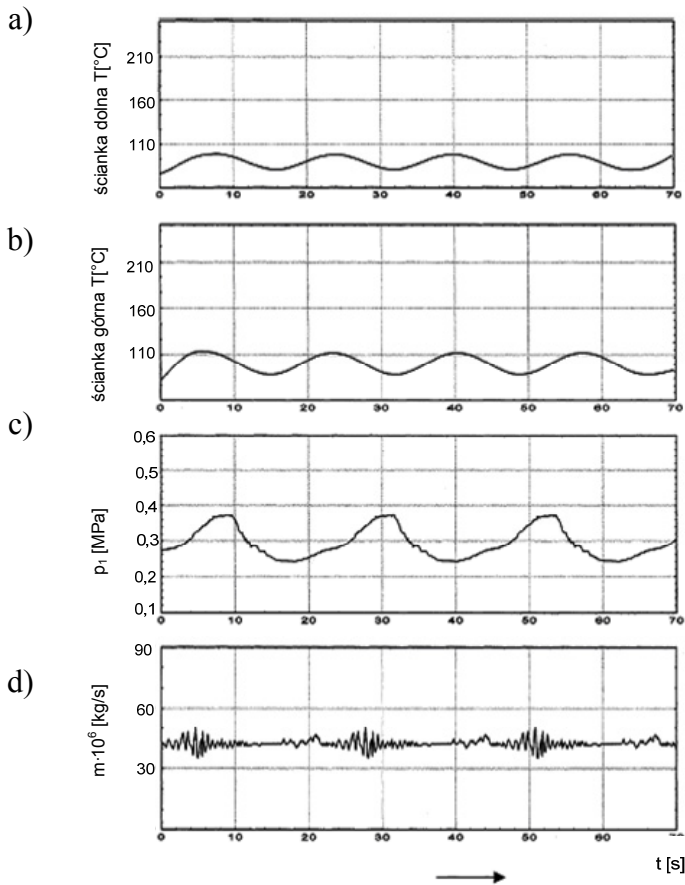
Interesujące wyniki badań dotyczące niestabilności ciśnieniowych zawarto w pracy [16]. Badania przeprowadzono dla przepływu czynnika R11 w kanale rurowym o średnicy wewnętrznej $d_w = 0,018$ m i długości 3,5 m. Na końcu kanału pomiarowego znajdowało się przewężenie o wartości $\beta = d_p/d_w = 0,448$, gdzie: d_p – średnica wewnętrzna przewężenia, d_w – średnica wewnętrzna kanału. Obserwowano niestabilności ciśnieniowe o dużej amplitudzie wahań ciśnienia, temperatury ścianki ogrzewanego kanału i masowego natężenia przepływu czynnika. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem niedogrzaną cieczy na dopływie do kanału pomiarowego wzrastała amplituda zmiany ciśnienia, a obniżenie strumienia masy czynnika w kanale powodowało jej zmniejszenie. Spadek niedogrzaną cieczy do temperatury nasycenia, jak również obniżenie natężenia przepływu czynnika w kanale powodowały zmniejszenie okresu fali ciśnieniowej. Stwierdzono również nakładanie się niestabilności ciśnieniowej i gęstości strumienia masy, co zwiększa i potęguje efekty tego zjawiska.

Na rys. 9 przedstawiono wyniki badań zmiany temperatury ścianki ogrzewanego kanału pomiarowego (na dole i na górze obwodu przekroju poprzecznego), ciśnienia na dopływie do kanału pomiarowego oraz masowego natężenia przepływu. Można zauważyć duże amplitudy temperatury ścianki z tym, że temperatura górnej powierzchni ścianki kanału oscyluje bardziej, niż dolnej. Należy zwrócić uwagę, że częstotliwość zmiany temperatury ścianki jest większa, od częstotliwości zmiany ciśnienia i strumienia masy w kanale. W prezentowanym przypadku wartość okresu zmian wynosiła odpowiednio 17, 22 i 24 s. Zmiany temperatury ścianki związane są ze zmianą stopnia zapełnienia w kanale, która jest wynikiem ilości odparowującego czynnika, co z kolei zależy od natężenia jego przepływu. Przy małym natężeniu przepływu niedogrzaną cieczy ulega

znacznemu zmniejszeniu, co sprzyja rozwojowi wrzenia i zwiększa ilość fazy gazowej w kanale (szczególnie w górnej części poziomego kanału). W fazie gazowej spada intensywność przejmowania ciepła i wzrasta temperatura ścianki. Wraz ze wzrostem fazy gazowej wzrastają opory przepływu, co powoduje zmianę ciśnienia. Zjawisko jest dodatkowo potęgowane przez przewężenie umieszczone na wypływie czynnika z kanału, które utrudnia wyrównanie ciśnienia w instalacji. Powstaje fala odbita, która wzmacnia efekt braku stanu stabilnego w układzie.

8. Falowy charakter niestabilności początku przemian fazowych

Niestabilności początku przemiany fazowej mogą występować podczas rozpoczęcia procesu wrzenia i skraplania czynnika roboczego w przepływie. Szczególnie duże zmiany parametrów ciepłno-przepływowych czynnika i ogrzewanej powierzchni mają miejsce na początku wrzenia [26]. Oscylacje ciśnienia i temperatury są wtedy znacznie większe i trwają dłużej, niż podczas zaburzeń, których przyczyną są fala ciśnieniowa lub zmiany gęstości strumienia masy. Już po osiągnięciu parametrów stanu wrzenia czynnika zaczynają pojawiać się niestabilne oddziaływania w przepływie. Niestabilności związane z początkiem wrzenia nazwano *oscylacją początku wrzenia*. Załóżmy, że do ogrzewanego kanału doprowadza się przechłodzony czynnik roboczy, który ulega podgrzaniu podczas przepływu w kanale. Po osiągnięciu odpowiedniego przegrzania rozpoczyna się proces wrzenia na ściance kanału. Powstanie mieszaniny dwufazowej powoduje gwałtowny wzrost oporów przepływu, wzrost ciśnienia i spadek gęstości strumienia masy. Taka zmiana parametrów czynnika „przesuwa położenie początku wrzenia” w kanale. W wyniku sprzężenia zmiany ciśnienia i gęstości strumienia masy początek wrzenia przesuwa się w kierunku odwrotnym, czyli spada ilość produkowanej pary, maleją opory przepływu i ciśnienie, a wzrasta gęstość strumienia masy. Oscylacje te charakteryzują się dużą wartością amplitudy.

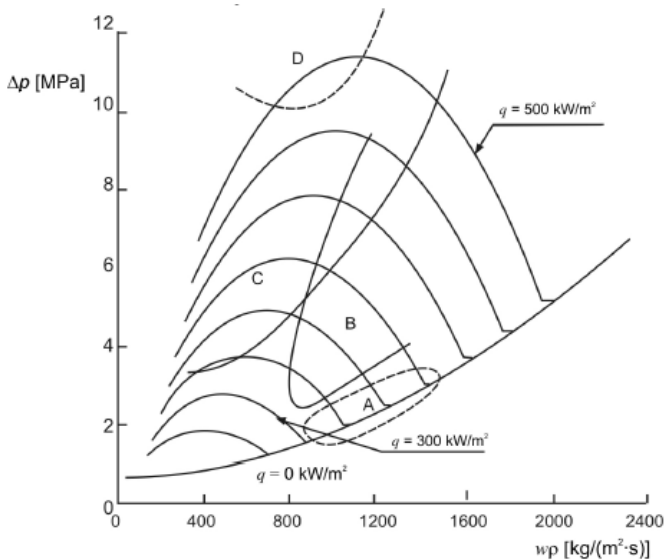


Rys. 9. Zależność parametrów przepływu dwufazowego od czasu w warunkach występowania niestabilności ciśnieniowych w kanale poziomym ($T_1 = 22^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 0,041 \text{ kg/s}$) [16]: a) temperatura ścianki na dole obwodu przekroju poprzecznego kanału, b) temperatura ścianki na górze obwodu przekroju poprzecznego kanału, c) ciśnienie na dopływie do kanału pomiarowego, d) masowe natężenie przepływu

Fig. 9. Dependence of two-phase flow parameters from time in condition of the occurrence of pressure instabilities in horizontal channel ($T_1 = 22^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 0.041 \text{ kg/s}$) [16]: a) wall temperature at the bottom of channel's cross-section perimeter, b) wall temperature at the top of channel's cross-section perimeter, c) pressure on inflow to measuring channel, d) mass flow intensity

W pracy [26] opisano szczegółowo badania eksperymentalne początku wrzenia wody w pionowym kanale rurowym, z przepływem czynnika ku górze. Badania przeprowadzono w szerokim zakresie parametrów cieplno-przepływowych: ciśnienie $p = 3 \div 10$ MPa, gęstość strumienia masy ($w\rho$) = $600 \div 1300$ kg/(m² · s), przechłodzenie cieczy na dopływie do kanału pomiarowego $\Delta T_s = 10 \div 90$ K, gęstość strumienia ciepła $q = 0 \div 700$ kW/m², stosunek przewężenia na wypływie czynnika z kanału pomiarowego $\beta = 0,33; 0,417; 0,5$, gdzie $\beta = \frac{d_i}{D}$, d_i – średnica wewnętrzna kanału na wypływie z odcinka pomiarowego, D – średnica wewnętrzna kanału na odcinku pomiarowym.

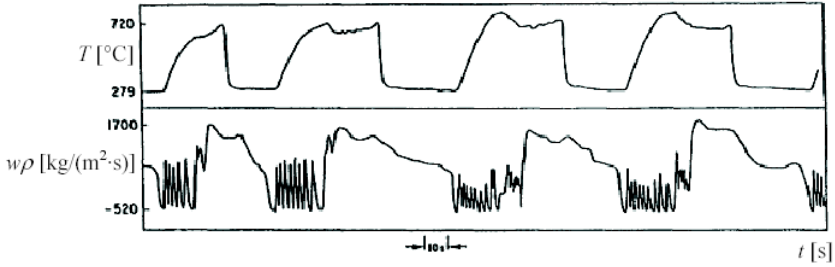
Podczas badań doprowadzano czynnik roboczy do kanału pomiarowego w postaci cieczy przechłodzonej, o ustalonych w czasie parametrach. Następnie quasistatycznie zwiększano strumień ciepła q_w na ogrzewanej ścianie, aż do rozpoczęcia procesu wrzenia. Wraz z rozpoczęciem procesu wrzenia występowały zaburzenia w układzie, które objawiały się zmianami ciśnienia, gęstości, strumienia masy i temperatury ogrzewanej ścianki kanału. Zaobserwowano oscylowanie tych parametrów. W przypadkach, gdy one zanikały, stan układu przyjmowano jako stabilny. Jeżeli następował rozwój i podtrzymywanie oscylacji parametrów przyjmowano, że układ jest niestabilny i znajduje się w równowadze chwiejnej. Niestabilnościom początku wrzenia towarzyszyły niestabilności ciśnieniowe oraz związane ze zmianą gęstości strumienia masy. Na rys.10 pokazano charakterystyczne obszary występowania niestabilności podczas wrzenia wody. W obszarze *A* występują niestabilności początku wrzenia, w obszarze *B* – typu ciśnieniowego, zaś w obszarach *C* i *D* mogą mieć miejsce niestabilności związane, odpowiednio ze zmianą strumienia masy oraz temperatury.



Rys. 10. Wyniki badań obszaru występowania niestabilności podczas wrzenia wody [26]; $p = 3,8 \text{ MPa}$, $\Delta T_S = 90\text{K}$, $\beta = 0,33$, *A* – obszar niestabilności początku wrzenia, *B* – niestabilności ciśnieniowe, *C* – niestabilności związane ze zmianą strumienia masy, *D* – niestabilności temperaturowe

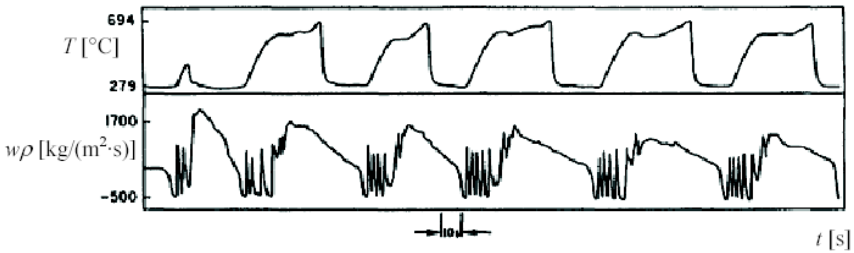
Fig. 10. Results of examinations of the area of the occurrence of instabilities during water boiling [26]; $p = 3.8 \text{ MPa}$, $\Delta T_S = 90\text{K}$, $\beta = 0.33$, *A*: instability area of boiling start, *B*: pressure instabilities, *C*: instabilities connected with mass flux change, *D*: temperature instabilities

Na rys. 11 i 12 przedstawiono przykładowe zmiany natężenia przepływu wody i temperatury ogrzewanej powierzchni kanału podczas występowania niestabilności na początku wrzenia. Można zauważyć, że okresy tych niestabilności są stosunkowo duże i wynoszą około $60 \div 120 \text{ s}$. Duże są również amplitudy zmiany gęstości strumienia masy i temperatury ścianki. Wynoszą one odpowiednio $500 \div 1200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ i $300 \div 500\text{K}$. Niestabilności początku wrzenia różnią się wyraźnie od oscylacji typu ciśnieniowego (rys. 13) i oscylacji zmiany strumienia masy (rys. 14).



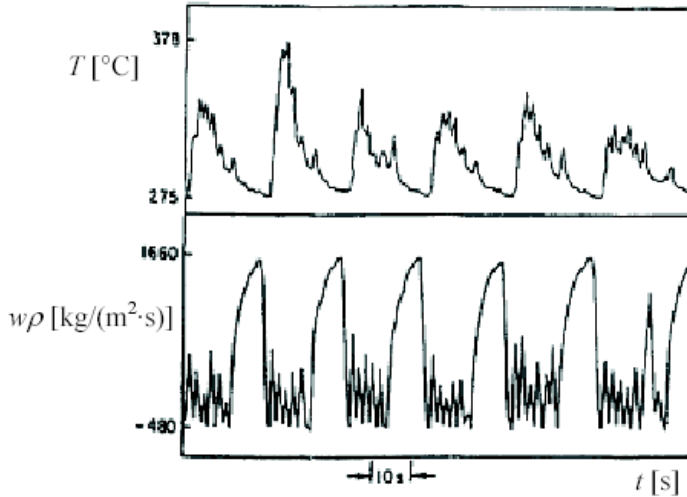
Rys. 11. Wyniki badań niestabilności początku wrzenia [26]; $p = 5,0$ MPa,
 $\Delta T_S = 60\text{K}$, $\beta = 0,417$, $(w\rho) = 1123,9$ kg/(m²·s), $\dot{Q} = 336,6$ kW/m²
 [26]

Fig. 11. Results of examinations of boiling start instabilities [26]; $p = 5.0$ MPa,
 $\Delta T_S = 60\text{K}$, $\beta = 0.417$, $(w\rho) = 1,123.9$ kg/(m²·s), $\dot{Q} = 336.6$ kW/m²
 [26]



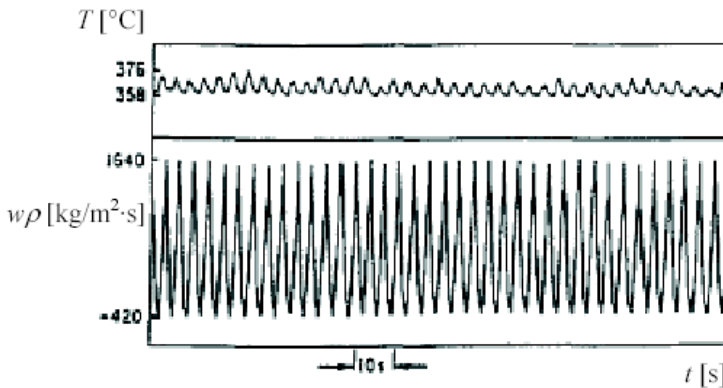
Rys. 12. Wyniki badań niestabilności początku wrzenia [26]; $p = 5,0$ MPa,
 $\Delta T_S = 90\text{K}$, $\beta = 0,417$, $(w\rho) = 9733,8$ kg/(m²·s), $\dot{Q} = 302,8$ kW/m²

Fig. 12. Results of examinations of boiling start instabilities [26]; $p = 5.0$ MPa,
 $\Delta T_S = 90\text{K}$, $\beta = 0.417$, $(w\rho) = 9,733.8$ kg/(m²·s), $\dot{Q} = 302.8$ kW/m²



Rys. 13. Wyniki badań niestabilności ciśnieniowych [26]; $p = 3,0$ MPa, $\Delta T_S = 90\text{K}$, $\beta = 0,33$, $(w\rho) = 1123,9$ kg/(m²·s), $\dot{Q} = 474,8$ kW/m²

Fig. 13. Results of examinations of pressure instabilities [26]; $p = 3.0$ MPa, $\Delta T_S = 90\text{K}$, $\beta = 0.33$, $(w\rho) = 1,123.9$ kg/(m²·s), $\dot{Q} = 474.8$ kW/m²



Rys. 14. Wyniki badań niestabilności związanych ze zmianą gęstości strumienia masy [26]; $p = 10,0$ MPa, $\Delta T_S = 90\text{K}$, $\beta = 0,33$, $(w\rho) = 937,5$ kg/(m²·s), $\dot{Q} = 580,5$ kW/m²

Fig. 14. Results of examinations of instabilities connected with the change of mass flux density [26]; $p = 10.0$ MPa, $\Delta T_S = 90\text{K}$, $\beta = 0.33$, $(w\rho) = 937.5$ kg/(m²·s), $\dot{Q} = 580.5$ kW/m²

Obszar niestabilności początku wrzenia jest niewielki. Zdarzają się one tylko przy dużym przechłodzeniu cieczy (dla wody powyżej 60K). Dla przechłodzenia wody wynoszącego około 50K zaobserwowano tylko pojedyncze cykle niestabilne, które ulegały wygaszeniu. Przy mniejszym przechłodzeniu nie stwierdzono oscylacji początku wrzenia. Stwierdzono również, że niestabilności początku wrzenia występują przy stosunkowo niskich gęstościach strumienia ciepła i znikają przy jego wzroście, a stan układu dąży do ustalonego. Okres oscylacji początku wrzenia jest większy, niż okresy oscylacji typu ciśnieniowego (3÷5 razy) i zmian strumienia masy. Amplitudy temperatury ścianki są również znacznie wyższe. Szczegółowy opis niestabilności w ośrodkach dwufazowych o charakterze falowym przedstawiono w pracy [13].

9. Podsumowanie

W opracowaniu ograniczono zakres analizy do dwóch charakterystycznych przemian fazowych, to znaczy wrzenia i skraplania. Brak pełnej odwracalności między tymi przemianami nie pozwala na deterministyczny sposób ich analizy, bowiem ich realizacji towarzyszą, niekiedy jakościowo różne zjawiska. Bez względu na to, czy przemiana fazowa zachodzi w objętości, czy też w przepływie, występowanie stanów niestabilnych tłumaczy się powstawaniem warunków nierównowagi termodynamicznej podczas ich realizacji. Wspólna przyczyna wywołania niestabilności skutkuje bardzo wieloma ich odmianami. Według obecnego stanu wiedzy klasyfikacja typów niestabilności jest bardzo utrudniona, z uwagi na znaczne rozproszenie źródeł bibliograficznych oraz stosowaną terminologię. Podkreślić należy, że zdecydowana większość publikacji w literaturze dotyczy prezentacji wyników badań eksperymentalnych, natomiast od kilku lat obserwuje się systematyczny wzrost liczby publikacji zawierających analizy teoretyczne niestabilności przemian fazowych. Istnieje jednak wiele obszarów, które wymagają dalszych badań.

Ważnym zagadnieniem jest falowy charakter niestabilności w ośrodkach wielofazowych. Badania wielu autorów prowadzone w okresie kilkunastu ostatnich lat dowiodły, że niestabilności występujące w ośrodkach wielofazowych (zwłaszcza dwufazowych) mają charakter falowy. Występuje znacząca różnica w ocenie niestabilności występujących w ośrodkach jednofazowych i dwufazowych. Niestabilności

o charakterze falowym występujące w przepływach dwufazowych wynikają przede wszystkim z oddziaływania dyssypatywnego i własności dyspersyjnych tych ośrodków. W pracy zwrócono uwagę na charakterystyczne formy niestabilności w ośrodkach dwufazowych, to znaczy: związane ze zmianami strumienia masy czynnika, niestabilności falowe o charakterze ciśnieniowym, temperaturowym i wywołane zmianą stopnia zapelnienia. Falowy charakter dotyczy również niestabilności towarzyszących stanom początkowym i końcowym przemian fazowych oraz niestabilnościom w mikrokanalach. W pracy przedstawiono analizę wpływu zmian różnych wielkości charakteryzujących przemianę fazową na wystąpienie niestabilności. Pokazano, że gwałtowna zmiana wymienionych wyżej parametrów (p , T , $w\rho$, φ) może powodować przejście układu w zakres stanów niestabilnych. Podano zakres parametrów, w których układ dwufazowy osiąga stany niestabilne.

Przemiany fazowe czynników energetycznych występują także w pewnym istotnym obszarze techniki, jakim są sprężarkowe instalacje chłodnicze. Wieloletnie badania autora oraz innych dowodzą, że sprężarkowe układy chłodnicze są bardzo „czułe” na wszelkie zaburzenia o charakterze wewnętrznym i zewnętrznym. W związku z zastąpieniem usuniętych z chłodnictwa freonów nowymi proekologicznymi czynnikami chłodniczymi występuje znaczący problem oceny form i skutków oddziaływania niestabilności przemian fazowych w takich układach.

Okazuje się, że nie wszystkie oceny niestabilności występujące dla różnych czynników energetycznych mogą być przeniesione do czynników chłodniczych. Wprawdzie ukazuje się w ostatnich latach wiele publikacji, dotyczących niestabilności przemian fazowych wrzenia i skraplania czynników chłodniczych (w tym nowych czynników), jednak ich zakres jest bardzo ograniczony. Jako nowatorskie należy wymienić badania dotyczące przemian fazowych czynników chłodniczych w warunkach zaburzeń jednostkowych oraz generowanych periodyczne [11, 12], o których publikacje w literaturze traktują śladowo.

W zakończeniu trzeba zaznaczyć, że problemy niestabilności przemian fazowych czynników energetycznych są ważne nie tylko z punktu widzenia poznawczego, ale także aplikacyjnego. Prawidłowa ocena występujących niestabilności w układach energetycznych wiąże się wyraźnie z bezpieczeństwem ich pracy. Zarówno deterministyczne, jak i probabilistyczne określenie stopnia odchylenia stanu układu od jego

stanu równowagi jest ważną informacją w eksploatacji układów energetycznych i może spowodować, że uniknie się awarii takich układów, przy wejściu w obszar stanów niestabilnych.

Literatura

1. **Badur J., Banaszekiewicz M.:** *A model of two-phase flow with relaxational-gradient microstructure*. Proc. 3th International Conference on Multiphase Flow, ICMF'98, Lyon, France, June 8-12. 1998.
2. **Badur J., Bilicki Z., Kwidziński R.:** *Operacyjna lepkość objętościowa w procesie transportu pędu ekspandującej wody i uderzeniowej kondensacji pary wodnej*. Zeszyty Naukowe IMP PAN, Gdańsk 479/1428/07.
3. **Bergles A.E.:** *Review of instabilities in two-phase systems*. Hemisphere Publishing Corporation, Bristol, 1977.
4. **Bilicki Z.:** *Opis systemu dwufazowego modelem ciągłym*. Prace Instytutu Maszyn Przepływowych. Gdańsk, nr 167/1066, 1983.
5. **Bilicki Z.:** *Koncepcja parametrów wewnętrznych na tle obecnych tendencji w termodynamice procesów nieodwracalnych i jej zastosowanie w przepływach dwufazowych*. Prace Instytutu Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk, 421/1379/94, 1994.
6. **Bilicki Z.:** *Nierównowaga termodynamiczna w ośrodku dwufazowym*. XVI Zjazd Termodynamików, Koszalin-Kołobrzeg, tom III, 45-73, 1996.
7. **Bilicki Z., Downar-Zapolski P.:** *Criteria of choking in nonequilibrium two-phase flow*. Archiwum Termodynamiki, vol. 13, no 1-4, 113-123, 1992.
8. **Bilicki Z., Kardaś.:** *Numeryczne modelowanie fal zagęszczonych w przepływach dwufazowych*. Prace Instytutu Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk, 386/1326/93, 1993.
9. **Bilicki Z.:** *Modelowanie przepływów wielofazowych*. Materiały XIII Krajowej Konferencji Mechaniki Płynów, Częstochowa, 21-26.09.1998, tom 3, 165-188, 1998.
10. **Bilicki Z.:** *Zjawiska falowe w przepływach dwufazowych*. Materiały XIII Krajowej Konferencji Mechaniki Płynów, Częstochowa, 21-26.09.1998, tom 3, 41-60, 1998.
11. **Bohdal T.:** *Investigation of boiling of refrigerating medium under conditions of impulse disturbances*. Int. J. Experimental Heat Transfer, vol. 17, no 2, 103-117, 2004.
12. **Bohdal T., Kuczyński W.:** *Investigation of boiling of refrigeration medium under periodic disturbance conditions*. Int. J. Experimental Heat Transfer, vol. 18, no 3, 135-151, 2005.

13. **Bohdal T.:** *Przyczyny niestabilności przemian fazowych czynników energetycznych.* Monografia, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2007.
14. **Cao L., Kakaç S., Liu H.T., Sarma P.K.:** *The effects of thermal non-equilibrium and inlet temperature on two-phase flow pressure drop type instabilities in an upflow boiling system.* Int. J. Therm. Sci. 39, 88-905, 2000.
15. **Carey V.P.:** *Liquid-vapor phase-change phenomena.* Hemisphere Publishing Corporation, Washington 1992.
16. **Comakli Ö., Karsli S., Yilmaz M.:** *Experimental investigation of two phase flow instabilities in a horizontal in-tube boiling system.* Energy Conversion and Management 43, 249-268, 2002.
17. **Gabaraev B., Kvalev S.A., Molochnikov Yu. S., Soloviev S.L., Usatkov S.V.:** *Boiling curve in temperature wave region.* Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 46, pp. 139-148, 2003.
18. **Kakaç S., Veziroglu T.N., Özboya N., Lee S.S.:** *Transient boiling flow instabilities in a multi-channel upflow system.* Wärme-Stoffübertragung, vol. 10, 175-178, 1977.
19. **Kakaç S., Veziroglu T.N., Padki M.M., Fu L. Q., Chen X. J.:** *Investigation of thermal instabilities in a forced convective upward boiling system.* Experimental Thermal Fluid Sci., Vol. 3, 181-201, 1990.
20. **Karsli S., Yilmaz M., Comakli O.:** *The effect of internal surface modification on flow instabilities in forced convection boiling in a horizontal tube.* Int. J. of Heat and Fluid Flow, vol. 23, 776-791, 2002.
21. **Mayinger F., Kastner W.:** *Berechnung Instabilitäten in Zweiphasenströmungen.* Int. J. Chem. Ing. Tech., vol. 40, 1185-1192, 1968.
22. **Mikielewicz J.:** *Wybrane zagadnienia generacji pary w obiegu dwuczynnikowym.* Biuletyn Instytutu Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk, nr 34/720/1972, 1972.
23. **Nguyen D.L., Winter E.R.F., Greiner M.:** *Sonic velocity in two-phase system.* Int. J. Multiphase Flow, vol. 7, no 3, 321-336, 1981.
24. **Seporaitis M., Pabarcus R., Almenas K.:** *Study of controlled condensation implosion events.* Proc of ICONE10. 10th Intern. Conf. on Nuclear Engineering, Arlington, Virginia (Washington DC), USA, 7 pages, 2002.
25. **Stenning A.H.:** *Instabilities in the flow of a boiling liquid.* J. Basic Eng. Trans., ASME, Series D, vol 86, 213-220, 1964.
26. **Wang Q., Chen J., Kakaç S., Ding Y.:** *Boiling onset oscillation: a new type of dynamic instability in a forced-convection upflow boiling system.* Int. J. Heat and Fluid Flow, vol. 17, 418-423, 1996.

Wykaz ważniejszych oznaczeń

c	- prędkość dźwięku, [m/s], ciepło właściwe, [J/kg·K],
d	- średnica wewnętrzna kanału rurowego, [m],
g	- przyspieszenie ziemskie, [m ² /s],
L	- długość kanału, [m],
\dot{m}	- strumień masy, [kg/s],
p	- ciśnienie [Pa], [MPa],
Δp	- spadek ciśnienia [Pa], [MPa],
R	- indywidualna stała gazowa, [J/kg·K],
q	- gęstość strumienia ciepła, [W/m ²],
\dot{Q}	- strumień ciepła, [W],
t	- czas, [s],
Δt	- przedział czasu, [s],
T	- temperatura, [°C],
ΔT	- spadek temperatury [K],
v	- prędkość fali, [m/s], objętość właściwa [m ³ /kg],
w	- prędkość płynu, [m/s],
x	- stopień suchości,
z	- współrzędna osiowa, [m],
$(w\rho)$	- gęstość strumienia masy, [kg/m ² s],
β	- współczynnik przewodzenia kanału,
φ	- stopień zapełnienia,
θ	- różnica temperatury, [K],
ρ	- gęstość, [kg/m ³],

Indeksy dotyczą:

Dolne

f	- tarcia,
F	- płynu,
h	- średnicy hydraulicznej,
kr	- parametrów krytycznych,
p	- ciśnienia, przewodzenia kanału,
s	- nasycenia,
T	- temperatury,
w	- ścianki, średnicy wewnętrznej,
wl	- parametrów na dopływie do kanału,
l	- parametrów początkowych,

górne

$prim$	- fazy ciekłej,
bis	- fazy gazowej.

Analysis of Instability in Phase Transitions of Energy Media.

Part I - Assessment of Knowledge

Abstract

A principle of operation of some machines and electrical equipment consists in making use of the phase transition of energy media in a thermodynamic cycle. Under the notion of an energy medium we understand both the energy carrier and also the thermodynamic factor being subject to the transitions and taking part in the conversion of energy, being directly or indirectly involved in it. Water, refrigerants, water solutions of salt, etc are rated among energy media. The fact that the phase transitions of energy media occurring in evaporators and condensers of machines and equipment are very 'sensitive' to all the instabilities, both external and internal in character, appearing in the course of operational use could be considered as well-substantiated.

In general, the instabilities in a two-phase flow could be divided into two categories. The flow is considered as static stable if the source of instabilities is inseparably tied up with parameters of the steady-state system. Due to the fact, that the instability follows from a change in value of the steady-state system parameters one can expect that it is possible to predict the onset of the instability merely knowing this steady state. The static instability mostly leads to the other working point of this system in a steady state or the periodic oscillations in its behaviour. As an example of static instabilities the instability of the first boiling crisis or a so-called *Leddinegg* instability could be mentioned. The instability of the first boiling crisis takes place in case of changing the heat-exchange mechanism during the process of boiling in volume. When the heat flux on the heated surface reaches the critical value the bubble boiling is replaced by the film boiling.

If the thermal or hydrodynamic reactions, giving the distinct inertial effects, are the main reason for the system instabilities, then the flow is unstable, dependent on so-called dynamic instabilities. Such the instabilities in flow through the two-phase medium of a fluid-gas type could be transferred by means of two mechanisms, i.e. the acoustic waves (pressure instabilities) and the waves of mass flux density change (as an effect of the filling ratio fluctuations). These phenomena are wavy in character, but the velocities of wave propagation are very different. The acoustic waves are marked by high frequencies, whereas the wave oscillations of mass flux density change usually have much lower frequency.

The acoustic instabilities result from the pressure-wave propagation in a two-phase flow. The acoustic oscillations may occur during the subcooled boiling and at the developed boiling in flow providing the critical heat flux was reached and the system was converted into the film boiling. According to *Bergles*, the acoustic oscillations may affect the course of flow. An amplitude of the acoustic pressure oscillations may reach the high value, compared the average value of the fluctuation frequency transition in two-phase media. The frequency of oscillations of this type recorded during the experimental investigations was within the scope $10 \div 10\,000$ Hz.

The wave of the mass flux density change velocity is relatively low, due to the time required for the fluid particle to flow through a coil pipe. Waves of this type are observed mostly in the course of boiling in flow, when a coil pipe is supplied with the fluid heated below the temperature of saturation (subcooled boiling). These oscillations follow directly from the relation between the process of boiling and the properties of a two-phase flow. An instantaneous drop in a flow rate at the intake results in an increase of the specific enthalpy in this region. The higher enthalpy at a part of a subcooled flow leads to a local rise in temperature of the medium. It reduces the value of fluid underheating to the saturation temperature and shifts the initial point of boiling inversely to a flow of the medium. From the onset of boiling in flow, a local filling ratio and a coefficient of vapour dryness in a coil pipe were increasing.

A local increase in the vapour dryness and the filling ratio led to the instability in a thickness of a thin film of fluid on a coil pipe wall. It can produce a change in the flow structure from a bubble an annular flow, which consequently causes the flow to be re-accelerated. There is an increase in a local gradient of pressure leading to the further drop in a total pressure during the two-phase flow in a coil pipe. Small fluctuations in a flow rate could be intensified until the specific amplitude of the wave of the mass flux density change was obtained. It has been confirmed by experimental investigations, which reveal the characteristic oscillation features of the wave of the mass flux density change. They pointed out that the oscillations of the wave of the mass flux density change are strongly dependent of changes in a heat flux density, a degree of cross-section reduction at the intake and the outlet of the medium in a coil pipe, a single- and two-phase frictional pressure drop in a coil pipe, super-cooling, a flow rate of the medium and changes in the system pressure.