

Ćwiczenie 5:

RUCH CIEPŁA PODCZAS KONDENSACJI NASYCONEJ PARY WODNEJ

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest ocena przebiegu procesu kondensacji nasyconej pary wodnej na zewnętrznej powierzchni chłodzonych poziomych rur o różnej geometrii.

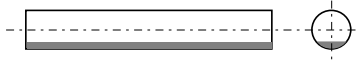




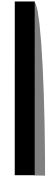
2. WIADOMOŚCI WPROWADZAJĄCE


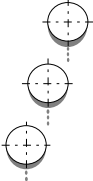
Do kondensacji (czyli skraplania) pary podczas jej kontaktu z zimną powierzchnią dochodzi w przypadku, gdy temperatura tej powierzchni (ściany) jest mniejsza od temperatury nasycenia pary dla danego ciśnienia. Przemiana fazowa pary w ciecz jest możliwa dzięki odbieraniu przez chłodną ścianę ciepła kondensacji. W celu uniknięcia akumulacji ciepła w samej ścianie, jej druga strona jest zwykle kontaktowana z zimnym płynem chłodzącym. W aparacie przeponowym, w którym zachodzi kondensacja (tzw. kondensatorze lub skraplaczu) ciepło przenoszone jest na drodze przenikania. Mechanizm ruchu ciepła pomiędzy rdzeniem fazy parowej i ścianą jest jednak w tym przypadku inny niż podczas przepływu ciepła pomiędzy gazami lub parą przegrzaną a chłodniejszą powierzchnią omywaną przez te płyny. W procesie kondensacji cząstki pary nie tylko są unoszone ku ścianie wirami konwekcji burzliwej, ale wytwarza się jednokierunkowy ruch cząstek ku ścianie spowodowany tym, że w jej bezpośrednim sąsiedztwie następuje skraplanie pary, a zatem gwałtowne zmniejszenie objętości. Skroplona część pary nie wraca do rdzenia pary, tylko pozostaje na ścianie, a na jej miejsce dopływa para świeża. Im ściana jest zimniejsza, tym wydajniejsze jest skraplanie i tym intensywniejszy ruch cząstek. Taki sposób transportu ciepła od rdzenia pary ku ścianie powoduje, że wpływ wirów burzliwego przepływu pary na transport ciepła odgrywa mniejszą rolę i może być najczęściej w ogóle pominięty. W bezpośrednim sąsiedztwie ściany, ruch ciepła napotyka na opory związane z obecnością wytworzonej na jej powierzchni warstwy skroplin. Przenoszenie ciepła przez tę warstwę zależy

zarówno od jej współczynnika przewodzenia ciepła, jak i od jej grubości. Wpływ prędkości przepływu pary na grubość ciekłej warstwy skroplin jest stosunkowo niewielki, gdyż lepkość pary jest dużo mniejsza od lepkości kondensatu, a zatem siła tarcia na granicy faz po stronie pary jest znacznie mniejsza od siły bezwładności kondensatu. Istotne zmniejszenie się grubości warstewki cieczy na powierzchni ściany, na skutek dynamicznego oddziaływania strumienia pary, objawiać się może dopiero przy jej bardzo dużej prędkości przepływu. W zakresie małej prędkości przepływu pary, bardziej istotnym zagadnieniem, wpływającym na grubość warstewki kondensatu, jest geometria i usytuowanie powierzchni chłodzącej, tabela 1.

Tabela 1

Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych powierzchni chłodzących w kondensatorach

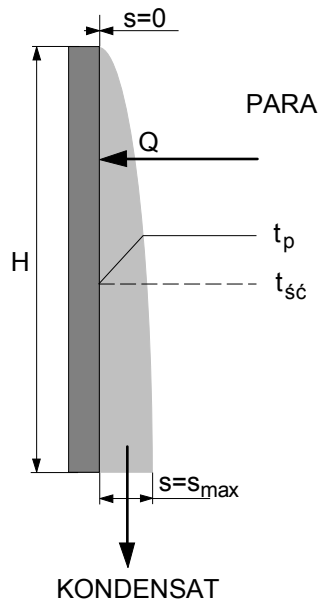
Rodzaj powierzchni	Rozwiązanie konstrukcyjne	
	mniej korzystne	bardziej korzystne
rura pozioma	 kondensacja wewnątrz rury	 kondensacja na zewnątrz rury
	 gładka	 z płetwą zbierającą skropliny
ściana pionowa	 długa	 krótka

układ rur poziomych	 <p data-bbox="517 526 678 555">nieprzestawny</p>	 <p data-bbox="914 526 1038 555">przestawny</p>
---------------------	--	---

Dobremu odprowadzaniu skroplin z powierzchni ściany, a tym samym małej grubości warstwy kondensatu o stosunkowo dużym oporze cieplnym, sprzyjają określone rozwiązania konstrukcyjne powierzchni, na której wytwarzają się skropliny. Ogólnie, do rozwiązań tych można zaliczyć:

- pionowe ukierunkowanie ruchu skroplin;
- prowadzenie procesu na zewnętrznej powierzchni rur poziomych;
- mała wysokość ścian pionowych;
- przestawne rozmieszczenia układu rur poziomych;
- stosowanie płetw zbierających kondensat z powierzchni rur poziomych;
- stosowanie blach ukierunkowujących przepływ kondensatu wewnątrz skraplacza.

Spływ skroplin w określonym miejscu zimnej ściany lub rury może mieć charakter uwarstwiony lub burzliwy. Grubość warstwy skroplin narasta na drodze ich spływu od zera do pewnej wartości maksymalnej, a zatem jest różna na rozmaitych wysokościach ściany, rys 2.



Rys. 2. Schemat ilustrujący spływ grawitacyjny kondensatu po pionowej ścianie

Charakter spływu zależy od grubości warstwy kroplin, ale jego burzliwość może wystąpić tylko w warstwach grubszych. Prawie zawsze spływ kroplin wzdłuż całej powierzchni ma charakter uwarstwiony, bowiem warstwa kondensatu jest bardzo cienka.

W trakcie przebiegu procesu kondensacji, przepływ ciepła pomiędzy parą i powierzchnią chłodzącą jest bardzo intensywny. Świadczyć o tym mogą praktycznie uzyskiwane wartości współczynnika wnikania ciepła, równe kilka lub kilkanaście kilowatów na metr kwadratowy powierzchni kondensacji pary, przy jednostkowej różnicy temperatury pomiędzy parą i chłodną ścianą. Jak wynika z danych literaturowych, współczynnik wnikania ciepła podczas kondensacji jest funkcją wielu parametrów, charakteryzujących nie kondensującą się parę lecz powstający kondensat. Ogólnie można zapisać, że

$$\alpha_k = f(\Delta t, r, \eta_k, \lambda_k, \rho_k, l_1, l_2, g)$$

gdzie: α_k - współczynnik wnikania ciepła podczas kondensacji, $W/(m^2 \cdot K)$;

Δt - różnica pomiędzy temperaturą zewnętrzną powierzchni warstwy kondensatu (przyjmowaną jako równą temperaturze pary nasyconej) a temperaturą ściany, K ;

r - ciepło przemiany fazowej (ciepło skraplania), J/kg ;

η_k - współczynnik dynamiczny lepkości kondensatu, $Pa \cdot s$;

λ_k - współczynnik przewodzenia ciepła kondensatu, $W/(m \cdot K)$;

ρ_k - gęstość kondensatu, kg/m^3 ;

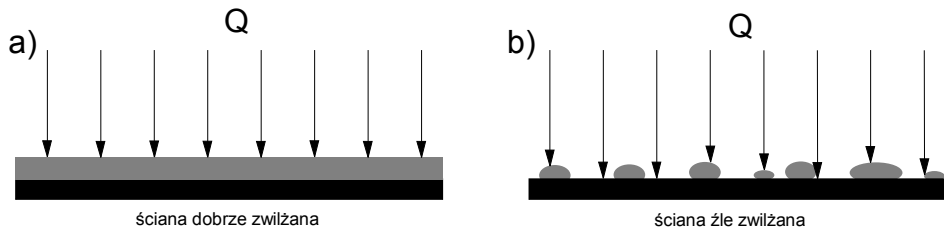
l_1, l_2 - podłużny i poprzeczny wymiar charakterystyczny warstwy skroplin, m ;

g - przyspieszenie ziemskie, m/s^2 .

W celu intensyfikacji przepływu ciepła podczas kondensacji, a tym samym zwiększenia ilości otrzymywanych skroplin, niekiedy rozwija się powierzchnię chłodzącą poprzez zaopatrzenie jej w żebra. W odniesieniu do powierzchni pionowych wykonuje się ożebrowanie wzdłużne; rury poziome wyposaża się natomiast w żebra poprzeczne. Aczkolwiek zwiększenie ożebrowania wpływa korzystnie na wydajność procesu kondensacji, to jednak należy pamiętać, że stosowanie wysokich żeber rozmieszczonych z małą podziałką sprzyja gromadzeniu się skroplin w przestrzeniach pomiędzy żebrami, a tym samym utrudniać przepływ ciepła przez warstwę kondensatu o stosunkowo dużej grubości.

O przebiegu kondensacji decyduje także zawartość w parze składników niekondensujących się (inertnych). Ich obecność powoduje wzrost zwiększenie dyfuzji cząstek pary w kierunku powierzchni skraplania, a tym samym wpływa hamująco na ilość wytwarzanych skroplin.

Intensywność przepływu ciepła podczas skraplania zależy również od chropowatości powierzchni chłodzącej i jej zwilżalności przez kondensat. Jeżeli powierzchnia ta jest słabo zwilżana przez skroploną na niej ciecz, to w miejsce kondensacji błonowej pojawi się tzw. kondensacja perlista, charakteryzująca się tym, że skropliny zamiast warstewki tworzą odosobnione krople. Ponieważ w takim przypadku, pewna część powierzchni skraplającej nie jest pokryta warstwą kondensatu, opory ruchu ciepła w tych miejscach są małe, gdyż odbiór ciepła zachodzi na powierzchni samej ściany, a nie na powierzchni warstwy skroplin. Przypadek ten obrazuje schemat przedstawiony na rys. 3.

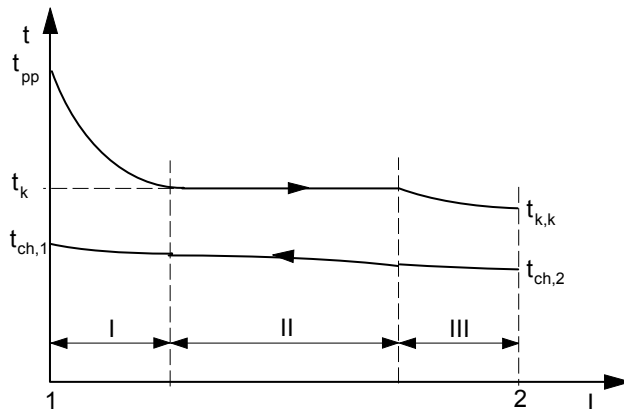


Rys. 3. Schemat procesu kondensacji a) błonowej; b) perlistej.

W przypadku kondensacji perlistej, współczynnik wnikania ciepła przyjmuje bardzo duże wartości, rzędu $\sim 10 \text{ kW}/(m^2 \cdot K)$. Z tego względu, kondensację

perlistą wywołuje się niekiedy celowo pokrywając powierzchnię wykraplania substancjami zmieniającymi napięcie międzyfazowe na granicy ciało stałe-ciecz-para.

Analizując przebieg procesu kondensacji pary przegrzanej lub dochładzanie otrzymanych skroplin, należy pamiętać o wzięciu pod uwagę typowo konwekcyjnego przepływu ciepła pomiędzy płynem a ścianą w zakresach temperatury odmiennych od temperatury nasycenia danej substancji pod określonym ciśnieniem. Na rys. 4 przedstawiono rozkład temperatury płynów w



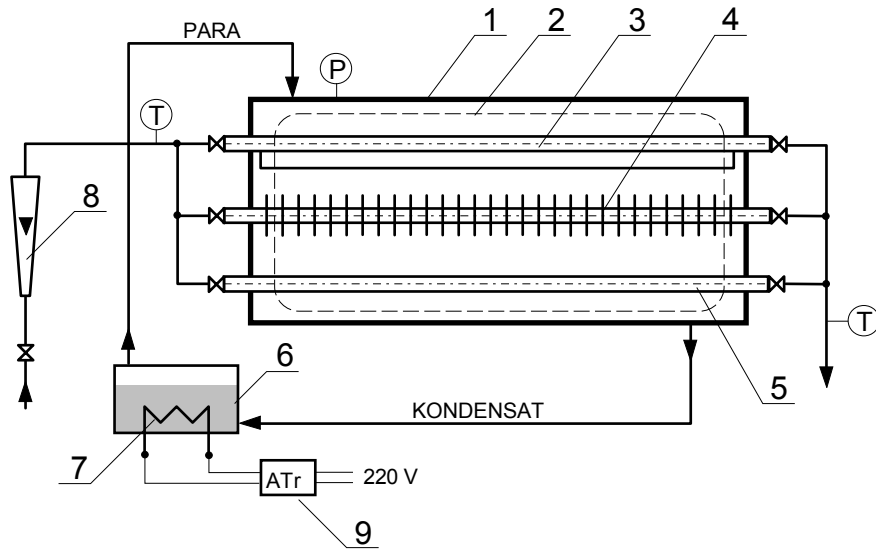
Rys. 4. Rozkład temperatury w przeponowym przeciwpądowym skraplaczu pary przegrzanej z dochładzaniem kondensatu.

t_{pp} - temperatura wlotowa pary przegrzanej, t_k - temperatura kondensacji, $t_{k,k}$ - temperatura końcowa kondensatu, $t_{ch,1,2}$ - temperatura płynu chłodzącego.

przeciwpądowym skraplaczu w którym zachodzi ochładzanie pary przegrzanej do temperatury kondensacji, skraplanie pary nasyconej i dalsze ochładzanie powstałego kondensatu. Zgodnie z zakresami zaznaczonymi na rys. 4, mechanizm wnikania ciepła charakterystyczny dla procesu kondensacji obowiązuje jedynie w strefie II skraplacza, natomiast w strefach I i III wnikanie ciepła obejmuje przypadek typowej konwekcji wymuszonej w parze lub w cieczy.

3. OPIS STANOWISKA BADAWCZEGO

Schemat stanowiska laboratoryjnego do badań przebiegu procesu kondensacji przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Schemat stanowiska badawczego

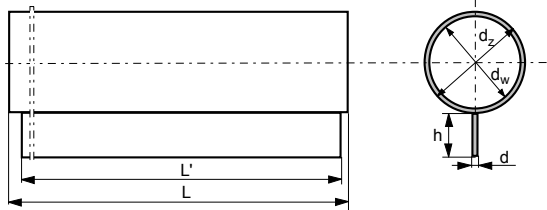
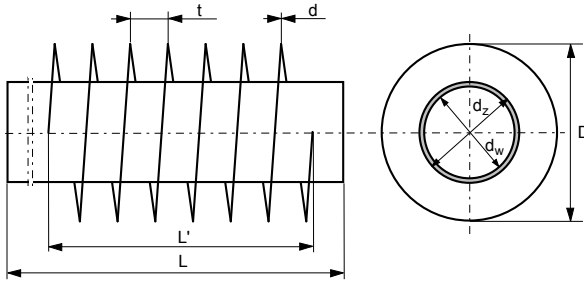
1 - komora kondensacyjna, 2 - wziernik, 3 - rura gładka z płetwą, 4 - rura ożebrowowana, 5 - rura gładka, 6 - wytwornica pary, 7 - grzałka elektryczna, 8 - rotametr, 9 - autotransformator, T - termometr, P - manometr.

Głównym elementem tego stanowiska jest komora kondensacyjna (1), zaizolowana cieplnie oraz zaopatrzona w wykonany z plexi wziernik (2), pozwalający na obserwację przebiegu tworzenia się kroplin. W komorze tej zainstalowano trzy poziome rury o różnej geometrii, na których zewnętrznej powierzchni prowadzony jest proces kondensacji. Schematy i wymiary rur

Tabela 2

Wymiary rur skraplacza laboratoryjnego

Rodzaj rury	Schemat	Wymiary, mm
gładka		$L = 530$ $d_z = 33,5$ $d_w = 29,5$

z płetwą		$L = 530$ $L' = 475$ $d_z = 33,5$ $d_w = 29,5$ $h = 25$ $\delta = 3,5$
ożebrowana		$L = 530$ $L' = 470$ $d_z = 28$ $d_w = 24$ $D = 57,5$ $t = 4,5$ $\delta = 0,5$

przedstawiono w tabeli 2. Źródłem nasyconej pary wodnej jest wytwornica pary (6) z grzałką elektryczną (7) o regulowanej mocy. Kondensat, po spłynięciu z powierzchni rur chłodzących, zbiera się w dolnej części komory i jest grawitacyjnie odprowadzany do wytwornicy pary. Jako płyn chłodzący przepływający przez wnętrza rur skraplacza, wykorzystywane mogą być: woda wodociągowa lub sprężone powietrze z sieci. Wartość strumienia substancji chłodzącej wewnętrzne powierzchnie rur, wskazywana jest przez rotametr δ . Rotametr ten wyposażono w wymienny komplet rur pomiarowych, wycechowanych w jednostkach strumienia określonego płynu (wody lub powietrza). Temperatura na wlocie i wylocie płynu odbierającego ciepło z poszczególnych rur skraplacza mierzona jest termometrami rtęciowymi, których końcówki wprowadzono do wnętrza przewodów. Układ zaworów odcinających pozwala na prowadzenie procesu kondensacji na powierzchni wybranej rury o określonej geometrii. Do pomiaru ciśnienia w komorze skraplania, a tym samym do określenia parametrów nasyconej pary wodnej, wykorzystywany jest manometr sprężynowy P. W celu minimalizacji strat ciepła do otoczenia, poszczególne elementy stanowiska zaizolowano warstwą ciepłochronnej pianki poliuretanowej.

4. METODYKA PROWADZENIA POMIARÓW

W celu przeprowadzenia oceny przebiegu procesu kondensacji na zewnętrznej powierzchni poziomych rur o różnej geometrii należy:

- a) sprawdzić poziom wody w wytwornicy pary i ewentualnie dokonać jej uzupełnienia;
- b) włączyć grzałkę wytwornicy pary i doprowadzić wodę do stanu wrzenia;
- c) w trakcie grzania sterować moc grzałki autotransformatorem;
- d) proces wytwarzania nasyconej pary wodnej w wytwornicy powinien być prowadzony pod ciśnieniem atmosferycznym. Kontrolę nadciśnienia umożliwia manometr zamontowany na komorze kondensacyjnej;
- e) przed osiągnięciem stanu wrzenia wody w wytwornicy włączyć obieg płynu chłodzącego, ustalając wartość jego strumienia w połowie zakresu pomiarowego rotametri;
- f) wykorzystując zawory odcinające wymusić przepływ płynu chłodzącego przez wnętrze rury gładkiej;
- g) od chwili pojawienia się pierwszych kropeł cieczy na powierzchni chłodzącej gładkiej rury, odczekać ok. 15 min w celu termicznej stabilizacji stanowiska badawczego;
- h) w międzyczasie należy tak regulować moc grzałki wytwornicy pary, ażeby ciśnienie w komorze było zbliżone do ciśnienia atmosferycznego i stałe;
- i) po zakończeniu okresu stabilizacji termicznej stanowiska, dokonać odczytu (kontrolowanej uprzednio w sposób ciągły) wartości strumienia płynu chłodzącego, a także jego temperatury na wlocie i wylocie z rury chłodzącej;
- j) przeprowadzić wzrokową ocenę przebiegu wykraplania się kondensatu na powierzchni rury (stopień pokrycia jej skroplinami, warunki spływania kondensatu z rury, itp.);
- k) wyniki obserwacji i pomiarów zanotować w tabeli.
- l) powtórzyć czynności wg pkt. f) ÷ j) w odniesieniu do dwóch pozostałych rur, zachowując taki sam strumień płynu chłodzącego;
- m) po zakończeniu pomiarów wyłączyć zasilanie grzałki elektrycznej w wytwornicy pary oraz odciąć dopływ płynów chłodzących do wnętrza rur komory kondensacyjnej;
- n) po spłynięciu całej ilości kondensatu z wnętrza komory kondensacyjnej do wytwornicy pary, uzupełnić ewentualne ubytki wody.

Kondensacja pary wodnej nasyconej

Rodzaj kondensującej się pary: nasycona para wodna

Powierzchnia chłodząca:

- rura gładka; - rura gładka z płetwą; - rura ożebrowana

Rodzaj płynu chłodzącego :

Strumień płynu chłodzącego:l/h

Powierzchnia	Temperatura płynu chłodzącego	Ciśnienie pary	Opis przebiegu powstawania i odbioru

chłodząca	włot	wylot	nasyconej	kondensatu
	°C	°C	kPa	
rura gładka				
rura z płetwą				
rura ożebrowana				

5. ZAKRES OPRACOWANIA WYNIKÓW

1. Sporządzić bilanse cieplne dla płynu chłodzącego dla każdej rury skraplacza. W tym celu wykorzystać równanie

$$Q = G_{ch} c_p (t_{wyl} - t_{wl}),$$

gdzie: Q - strumień ciepła pobieranego przez płyn chłodzący, W;

G_{ch} - strumień masowy płynu chłodzącego, kg/s;

c_p - średnie ciepło właściwe płynu chłodzącego, J/(kg·K);

t_{wyl} - temperatura wylotowa płynu chłodzącego, °C;

t_{wl} - temperatura wlotowa płynu chłodzącego, °C.

2. Zakładając, że kondensująca się para była parą suchą, określić strumień kondensatu wytwarzającego się na powierzchni każdej z rur, wykorzystując zależność

$$G_k = \frac{Q}{r},$$

gdzie: G_k - strumień masowy kondensatu, kg/s;

r - ciepło skraplania nasyconej pary wodnej w warunkach odpowiadających ciśnieniu w komorze, J/kg;

3. Odnieść wartość strumienia powstającego kondensatu do wielkości powierzchni zewnętrznej rury na której on się wytwarzał.
4. Podać wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia z uwzględnieniem wzrokowej oceny przebiegu procesu wykraplania prowadzonej w trakcie pomiarów.

6. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

[1] HOBLER T.: Ruch ciepła i wymienniki, WNT, W-wa 1986

[2] MADEJSKI J.: Teoria wymiany ciepła, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1998

7. TEMATYKA ZAGADNIEŃ KONTROLNYCH

1. Mechanizm kondensacji pary na zimnych powierzchniach.
2. Spływ grawitacyjny warstwy cieczy po powierzchni pionowej.
3. Zasady konstruowania powierzchni chłodzących w skraplaczach.
4. Wpływ obecności gazów niekondensujących się na przebieg skraplania pary.
5. Sposoby i zasady prowadzenia ogrzewania parowego w aparaturze procesowej.