

Doc. dr hab. inż. Kazimierz Brodowicz

Mgr inż. Stanisław Kasprzak

Instytut Techniki Ciepłej

POMIAR TEMPERATURY PUNKTU ROSY ZMODYFIKOWANĄ METODĄ LUSTERKOWĄ

1. Wstęp

Temperatura mieszaniny parowo-gazowej, przy której zawarta w niej para osiąga stan nasycenia, nosi nazwę temperatury punktu rosy. Jeżeli znany jest rodzaj pary, a tym samym zależność prężności tej pary od temperatury, a ponadto parametry intensywne mieszaniny, tj. temperaturę i ciśnienie, to określenie temperatury punktu rosy jednocześnie wyznacza stężenie pary w mieszaninie. Temperaturę punktu rosy można wyznaczyć mierząc temperaturę powierzchni, na której pojawia się rosa. Wykrycie pojawiającej się rosy jest szczególnie łatwe, jeżeli kondensacja występuje na powierzchni zwierciadła, gdyż powstałe krople rosy bardzo zmieniają zdolność odbicia światła od powierzchni zwierciadła, co łatwo zarówno zaobserwować jak i zmierzyć.

Na tej zasadzie oparta jest klasyczna metoda lusterkowa pomiaru temperatury punktu rosy, która może być przeprowadzona w dwóch nieco odmiennych wersjach. W pierwszej lusterko jest podgrzewane (lub ochładzane) i istnieje możliwość pomiaru jego temperatury w funkcji czasu. Temperatura powierzchni zwierciadła ochładzanego w momencie pojawienia się rosy i temperatura podgrzewanego zwierciadła w momencie zanikania rosy jest podstawą do wyznaczania średniej arytmetycznej z tych dwóch temperatur, którą przyjmuje się umownie jako temperaturę punktu rosy. W drugiej wersji nieco rozbudowanej w sensie

miarowym, z systemem ogrzewania sprzężony jest układ optyczny, który pozwala na dokładniejszy niż poprzednio pomiar temperatury powierzchni zwierciadła w momencie powstawania rosy i ta temperatura uważana jest za temperaturę punktu rosy [1,2]. Obie te wersje obarczone są poważnym błędem systematycznym, omówionym szczegółowo w punkcie 2 niniejszego opracowania.

W przedstawionej modyfikacji zastosowano zwierciadło o temperaturze zmiennej wzdłuż jego długości, ale ustalonej w czasie. Zwierciadło wyposażone jest w termoelementy pozwalające na określenie rozkładu temperatur na jego powierzchni. Za temperaturę punktu rosy uważa się temperaturę zwierciadła występującą w miejscu pojawienia się rozwiniętych kropeł rosy widocznych gołym okiem.

2. Omówienie przyczyn powodujących systematyczne błędy w określaniu punktu rosy w dotychczasowej metodzie na tle analizy kondensacji na powierzchni zwierciadła

W procesie kondensacji w nieustalonych warunkach występujących w obu wersjach wyodrębnić można dwa ważne etapy procesu. Pierwszy związany jest z nukleacją heterogeniczną, tj. powstawaniem zarodki na powierzchni zwierciadła, drugi obejmuje wzrost istniejących już kropeł. Pierwszy z nich jest niezbędny dla procesu, ale drugi decyduje o osiągnięciu równowagi termodynamicznej.

Równowagę termodynamiczną w badanym procesie przebiegającym przy stałym ciśnieniu wyrazić można za pomocą temperatury równowagowej. Wartość jej można przedstawić w postaci sumy trzech składników

$$T_r = T'_r - \Delta T_{EK} + \Delta T_{ER},$$

gdzie:

T'_r - temperatura równowagowa występująca gdy ciecz składa się wyłącznie z tej samej substancji co para, a faza gazowa oddzielona jest od cieczy powierzchnią płaską,

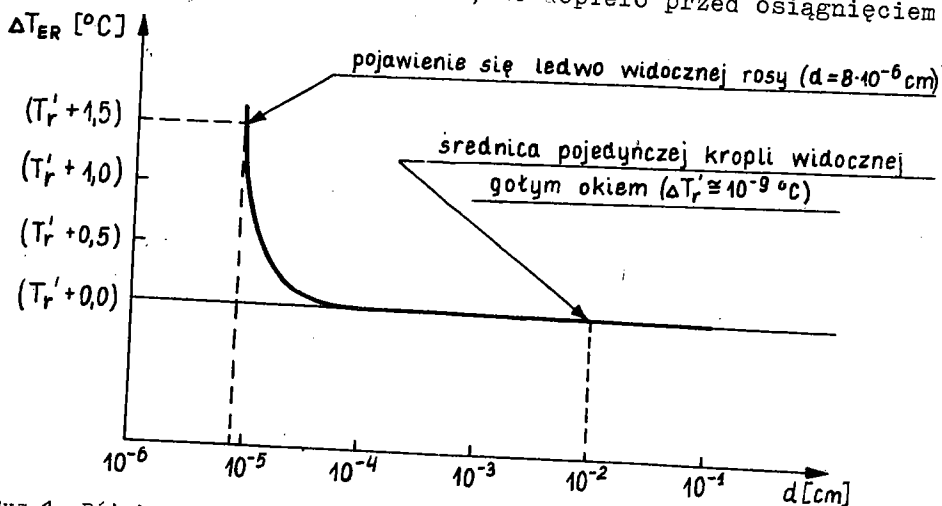
ΔT_{EK} - poprawka temperatury wynikająca z równowagi w otoczeniu zakrzywionej powierzchni cieczy (efekt Kelwina),

ΔT_{ER} - poprawka temperatury wynikająca z zanieczyszczenia cieczy (efekt Raoulta).

Efekt Kelwina określa podwyższenie ciśnienia równowagowego nad powierzchnią wypukłą cieczy w wyniku działania sił napięcia powierzchniowego [1,3]. Utrudnia to kondensację w kroplę o małych wymiarach w stosunku do kondensacji w ciecz o powierzchni płaskiej. Ponieważ w warunkach eksperymentu temperatura kropli jest równa temperaturze powierzchni zwierciadła, to im mniejsza kropla, tym zimniejsze musi być zwierciadło, aby wystąpiła równowaga termodynamiczna między otaczającą parą a cieczą zawartą w tej kropli. Efekt ten dla kropli o wymiarach $8 \cdot 10^{-6}$ [cm], niewidocznych pojedynczo gołym okiem, ale których obecność jest zauważalna w postaci nalotu na powierzchni zwierciadła, obniża temperaturę równowagi o $\Delta T_{EK} = 0,15$ [°C]. Dla kropli o wymiarach $8 \cdot 10^{-5}$ [cm] również pojedynczo jeszcze niewidocznej tylko o $\Delta T_{EK} = 0,015$ [°C]. Zaś przy kroplach widocznych gołym okiem, a więc większych niż 10^{-2} [cm] efekt ten jest zupełnie pomijalny.

Efekt Raoulta odgrywa ważniejszą rolę i wynika z rozpuszczonych w kropli zanieczyszczeń, które obniżają ciśnienie cząstkowe pary kondensującej się, a tym samym i temperaturę kondensacji. W warunkach rzeczywistych zanieczyszczenia zawsze występują i wywołane są obecnością śladowych ilości obcych substancji. W wyniku tego efektu rosa powstaje na powierzchni, której temperatura jest nieco wyższa niż temperatura punktu rosy. Powstawanie kondensacji w tych warunkach szczególnie badał Davies [4], który wykazał, że krople powstają na powierzchni, której temperatura przekracza punkt rosy (w temp. 0 [°C]) o $0,4 \div 1,5$ [°C]. Na podstawie tych badań można oszacować przy pewnych założeniach wpływ efektu Raoulta. Zakładając stałą wartość bezwzględną substancji zanieczyszczającej w kropli, efekt ten będzie malał ze wzrostem objętości kropli, a więc proporcjonalnie do sześcianu jej średnicy. Przy wymiarze kropli rzędu $8 \cdot 10^{-6}$ [cm] różnice temperatury punktu rosy na podstawie przytoczonych badań wynoszą

(dla $0 [^{\circ}\text{C}]$) $\Delta T_{\text{ER}} = 1,5 [^{\circ}\text{C}]$, stąd można przedstawić wykresie funkcję różnicy temperatur ΔT_{ER} od średnicy kropli (rys.1). Z wykresu tego wynika, że dopiero przed osiągnięciem



Rys.1. Różnice temperatur wywołane efektem Raoult'a w funkcji średnicy kropli

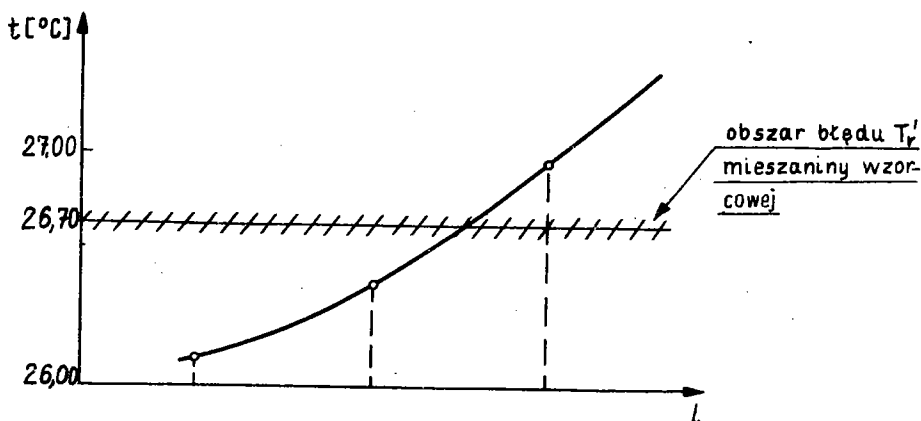
temperatury prawdziwego punktu rosy następuje gwałtowny wzrost średnic kropeł aż do osiągnięcia widocznych gołym okiem wymiarów.

3. Propozycje modyfikacji klasycznej metody i opis jej technicznej realizacji

Zaproponowana metoda polega na użyciu zwierciadła o temperaturze zmiennej w sposób ciągły na jego powierzchni, ale stałej w czasie. Temperatura powierzchni zwierciadła zmienia się od wartości nieco powyżej temperatury punktu rosy do nieco poniżej tej wartości.

Rozkład temperatury na powierzchni zwierciadła przedstawiono na wykresie (rys.2), a powstałe po odpowiednio długim czasie kondensacji zaroszenie przedstawiono na fotografii (rys.3). Potwierdzony jest tu fakt znacznego wzrostu średnic kropeł na bardzo małej długości zwierciadła, co umożliwia wyraźne ustalenie miejsca powstania widocznych gołym okiem kro-

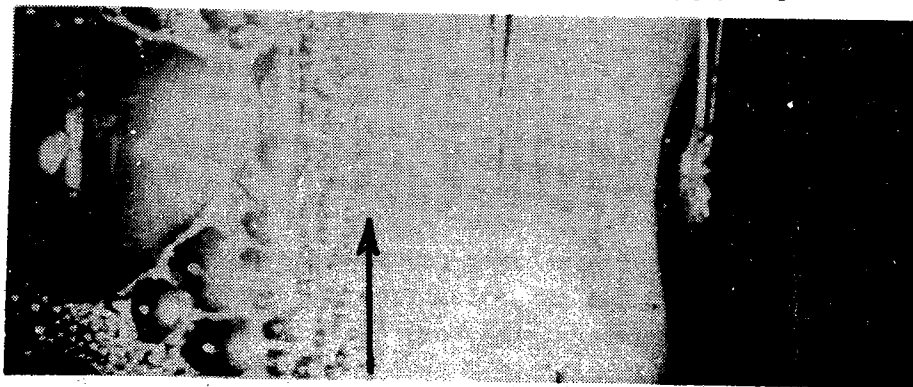
pel. Miejsce to łatwo zlokalizować dzięki skali utworzonej przez przylutowane termoelementy. Znając rozkład temperatury



Rys.2. Rozkład temperatury powierzchni w funkcji długości

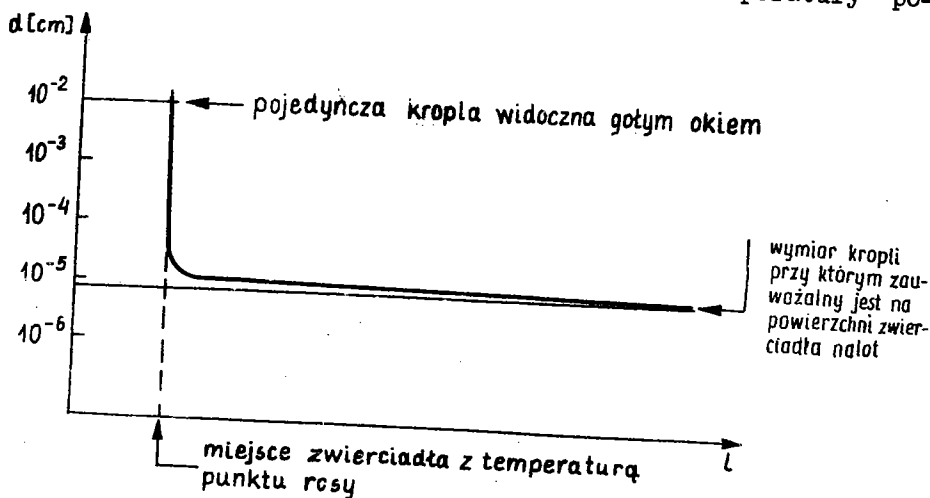
wzdłuż powierzchni zwierciadła można określić temperatury powstawania tych kropeł. Dodatkowo wyjaśnia to przedstawiony rozkład wymiaru kropeł w funkcji długości zwierciadła (rys.4), przy założeniu rozkładu temperatur względem długości wg rys.2, wyliczony na podstawie danych Davies'a.

Omówiony rozkład temperatury uzyskano na powierzchni zwierciadła chłodzonego w określony sposób. Powierzchnię zwierciadła tworzy mosiężna blacha polerowana i chromowana o długości 60 [mm], szerokości 30 [mm] i grubości 0,5 [mm], do której przylutowano pięć termoelementów, umożliwiających pomiar tem-



Rys.3. Zdjęcie fragmentu zwierciadła z widoczną granicą występowania dużych kropeł (zaznaczone strzałką). Na zdjęciu widoczne są 4 termoelementy (powiększenie 5 x)

peratury powierzchni w pięciu punktach powierzchni. Na podstawie tych pomiarów określić można rozkład temperatury po-



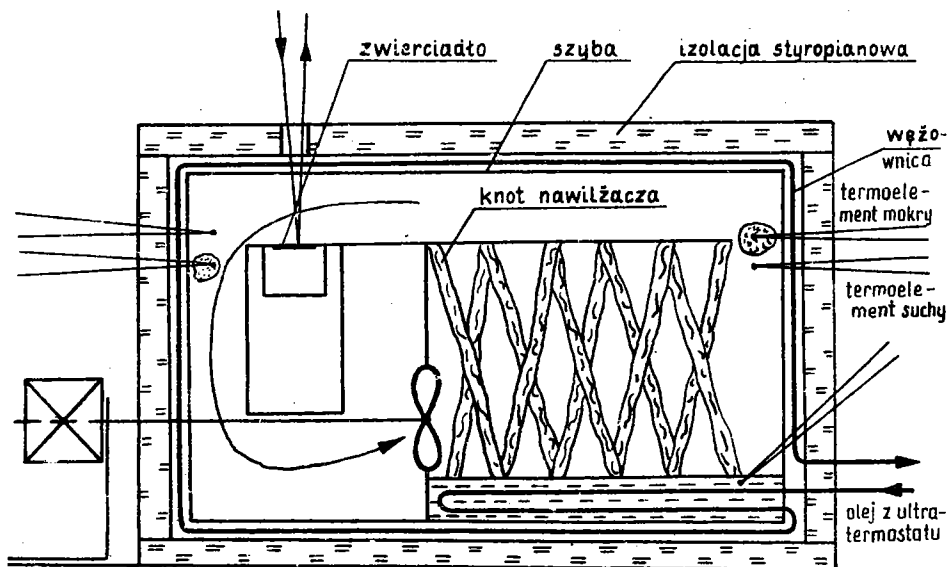
Rys.4. Rozkład średnic kropeł wzdłuż zwierciadła

wierzchni zwierciadła. Rozkład temperatury powierzchni zwierciadła był ustalony w czasie. Przepływ oleju, dostarczanego z ultratermostatu zapewniał odpowiednią temperaturę, a dodatkowa chłodnica zasilana wodą, której temperatura różniła się o kilka stopni od temperatury oleju, wywoływała gradient temperatury wzdłuż powierzchni (rys.2). Różnice temperatur w poprzek zwierciadła są pomijalnie małe, czego dowodem jest linia granicy zaroszenia zwierciadła, która była zawsze w przybliżeniu prostopadła do osi wzdłużnej zwierciadła.

Termoelementy wykonane zostały z drutów miedź-konstantan o średnicy 0,3 [mm] i zostały przyłutowane do powierzchni zwierciadła. Siła termoelektryczna była mierzona za pomocą kompensatora KM 76a z galwanometrem magnetoektrycznym GL-1 o czułości $16,5 \cdot 10^{-9}$ [A/dz]. Zestaw ten pozwalał mierzyć temperaturę z dokładnością do 0,03 [°C].

4. Weryfikacja zaproponowanej metody i analiza uzyskanej dokładności

W celu sprawdzenia dokładności przedstawionej metody pomiaru punktu rosy przeprowadzono eksperyment sprawdzający, który polegał na wprowadzeniu zwierciadła do mieszaniny parowo-gazowej o znanej temperaturze w stanie nasyconym, którą wytworzono w specjalnie w tym celu zbudowanej komorze (rys.5).



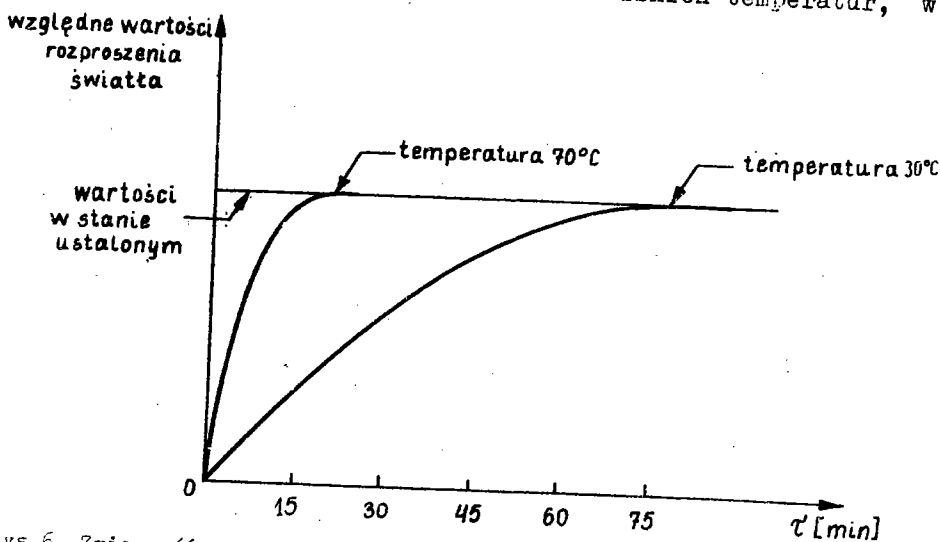
Rys.5. Schemat komory pomiarowej używanej przy weryfikacji metody

Szczegóły budowy komory są następujące: Komora zbudowana jest z blachy stalowej w kształcie prostopadłościanu o wymiarach $700 \times 400 \times 250$, od góry przykryta jest odpowiednio uszczelnioną szybą szklaną. Wewnątrz komory znajduje się taca z wodą podgrzewaną węzownicą do dowolnej temperatury w zakresie 30 ± 90 [°C].

W wodzie zanurzone są knoty z tkaniny o rozwiniętej powierzchni. Między wilgotnymi knotami przepływa powietrze z prędkością 3 [m/s]. Przepływ wywołuje wentylator napędzany silnikiem elektrycznym, umieszczonym na zewnątrz komory. Do ścian komory od strony zewnętrznej umocowane są węzownice zapobiegające stratom ciepła. Są one zasilane z tego samego ul-

tratermostatu, co węzownica zanurzona w wodzie znajdującej się na tacy. Całość izolowana jest styropianem. Dodatkowo kontrolowano stan nasycenia za pomocą mokrego termometru. Stwierdzono nawet po długim czasie, rzędu kilkunastu godzin, że stan nasycenia nie został w pełni osiągnięty. Wilgotność względna wyznaczona z pomiaru metodą mokrego termometru wynosiła przy 90 [°C] - 99,6%, a przy 30 [°C] - 99,8%. Wartości te nieznacznie odbiegają od stanu nasycenia, jednakże pozwalają określić temperaturę punktu rosy z dokładnością $\pm 0,02 \div 0,05$ °C.

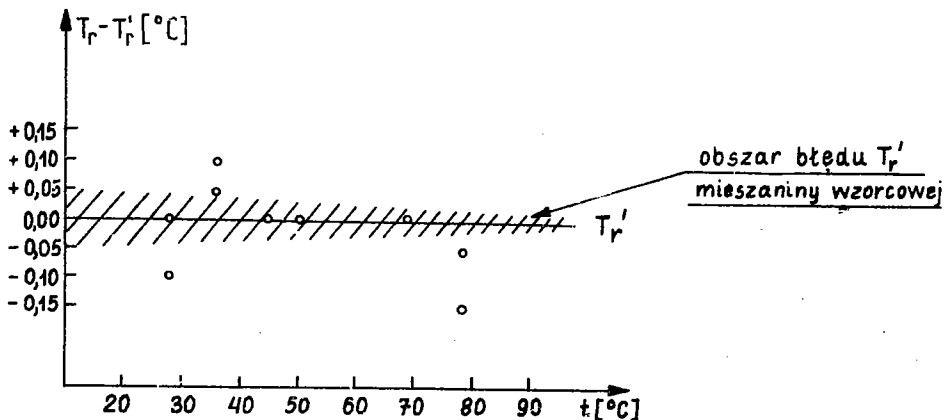
Zaproponowana metoda wymaga warunków ustalonych w czasie, i dopiero po ich uzyskaniu można określić miejsce wystąpienia na zwierciadle rosy widocznej gołym okiem i znaleźć temperaturę punktu rosy. Należy zatem znać przedziały czasu, po jakich te warunki ustalone mogą być osiągnięte. W celu poznania tych przedziałów wykonano dodatkowe pomiary w warunkach nieustalonych, mierząc w czasie zmienność zaroszenia zwierciadła poprzez pomiar światła rozproszonego. Wyniki przedstawiono na rys.6. Z pomiarów tych wynika, że dla niskich temperatur, w



Rys.6. Zmienność rozproszenia światła proporcjonalna do zaroszenia powierzchni zwierciadła w funkcji czasu

pobliżu +30 [°C] czas ustalenia się warunków równowagi przekracza jedną godzinę, dla wyższych temperatur - w granicach 1/4 godziny (np. przy 70 [°C] - 14 minut).

Pomiary sprawdzające przedstawioną metodą wykazały, że błąd bezwzględny pomiaru dla zakresu temperatur od 30 [°C] do 90 [°C] zawiera się w granicach $\pm 0,15$ [°C] - rvs.7.



Rys.7. Błąd pomiaru temperatury punktu rosy dla różnych wartości temperatur bezwzględnych

5. Wady i zalety zaproponowanej metody

Do wad metody zaliczyć można długi czas ustalania się warunków równowagi, szczególnie w niskich temperaturach. Unieumożliwia to pomiar parametrów mieszanin, które wykazują zmienność własności w czasie. Wadą jest również fakt, że struktura zaroszenia zmienia się z małych kropeł, niewidocznych gołym okiem, do dużych widocznych jednak na pewnej niewielkiej przestrzeni, a nie skokowo.

Do zalet zaliczyć można:

- dokładność pomiaru temperatur punktu rosy przewyższającą dokładność stosowanych dotychczas metod i to w warunkach bez zachowania specjalnej czystości powierzchni zwierciadła lub mieszaniny,
- możliwość pomiaru w dowolnym zakresie temperatur i ciśnień oraz mały wpływ prędkości przepływającej mieszaniny.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Wexler A.: Humidity and Moisture. Reinhold Publ. Corp. Vol.1. N.Y. 1965.
- [2] Łapiński M., Kostyrko K., Włodarski W.: Nowoczesne metody pomiaru i regulacji wilgotności. WNT. Warszawa 1968.
- [3] Melrose J.C.: Model Calculations for Capillary Condensation. A.I.Ch. E. Journal, sept. 1966.
- [4] Davies D.K.: The Inscipient Condensation of Water Vapour on a Gold Surface. Brit. J. Appl. Phys. 14, 567. 1963.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТОЧКИ РОСЫ
МОДИФИЦИРОВАННОМ ЗЕРКАЛЬНОМ МЕТОДОМ

К р а т к о е с о д е р ж а н и е

В модифицированном зеркальном методе измерения точки росы смеси было применено зеркало с постоянной по времени и переменной по длине температурой, распределение которой определяют соответственно расположены термоэлементы. Температуру точки росы смеси определяет температура зеркала в точке образования росы в виде заметных невооружённым глазом капли.

DEW POINT TEMPERATURE MEASUREMENT BY THE MODIFIED MIRROR METHOD

S u m m a r y

A mirror has been used in the modified mirror method for the measurement of dew point temperature of mixtures, that embodies a time constant and a length variable temperature; the distribution of the latter being determined by thermo-couples mounted properly for this purpose.

The dew point temperature of a mixture is determined by the temperature in the point of the mirror surface where drops of dew are visible to a naked eye.

Rękopis dostarczono w lipcu 1972 r.