

Marek PRONOBIS

BADANIE WSPÓŁCZYNNIKÓW WNIKANIA MASY METODĄ SUBLIMACJI NAFTALENU

Streszczenie. Opisano sposób prowadzenia pomiarów współczynnika wnikania masy podczas sublimacji naftalenu omywanego strumieniem powietrza w różnego typu wymiennikach konwekcyjnych. Określono wpływ sposobu wykonania próbki na wyniki pomiarów oraz wyznaczono zależność między temperaturą odlewania a gęstością odlewu naftalenowego. Badania prowadzono dla przestawnego pęczka rur gładkich oraz dla przestawnego pęczka ożebrowanego z żebrami wzdłużnymi ustawionymi pod kątem do kierunku czynnika omywającego. Podano ogólny algorytm wyznaczania średnich i lokalnych wartości liczby Sherwooda dla omawianego przypadku wymiany masy.

1. Wstęp

Badanie intensywności wnikania masy metodą sublimacji naftalenu w strumieniu powietrza jest techniką pomiarową, która zasługuje na szersze rozpowszechnienie. Pozwala bowiem na dokładne określenie zarówno średnich, jak i lokalnych wartości konwekcyjnego współczynnika wnikania masy w badanych układach.

Wykorzystując przy tym analogię między konwekcyjnym przepływem masy i ciepła wyznaczyć można współczynniki wnikania ciepła z dokładnością wystarczającą dla celów technicznych. Omawiana metoda z uwagi na swą prostotę jest szczególnie korzystna przy wyznaczaniu lokalnych wartości liczby Nusselta, co innymi metodami jest na ogół skomplikowane i kosztowne. Zastosowanie metody sublimacji przy modelowaniu kotłów umożliwi np. wyznaczenie rozkładów intensywności przejmowania ciepła w skomplikowanych pęczkach rurowych, pozwalając na określenie miejsc najbardziej narażonych na przegrzanie.

Niniejsze opracowanie, wykorzystując badania własne oraz wyniki opublikowane przez innych autorów, przedstawia sposób prowadzenia pomiarów intensywności wnikania masy w różnego typu wymiennikach konwekcyjnych.

2. Sposób wykonywania elementów pomiarowych

Powierzchnię sublimującą z naftalenu do pomiarów wartości średnich współczynnika wnikania masy uzyskiwać można przez odlewanie w formach metalowych bądź też przez pokrywanie elementów badanych cienką warstwą sub-

stacji. W przypadku pomiarów lokalnych, z uwagi na wymaganą gładkość i twardość powierzchni, stosować można jedynie technikę odlewania.

Formy odlewnicze najkorzystniejszą jest wykonywać z odpornych na korozję metali - miedzi, brązu lub stali nierdzewnej.

Powierzchnie, które mają się stykać z naftalenenem powinny być dokładnie wypolerowane.

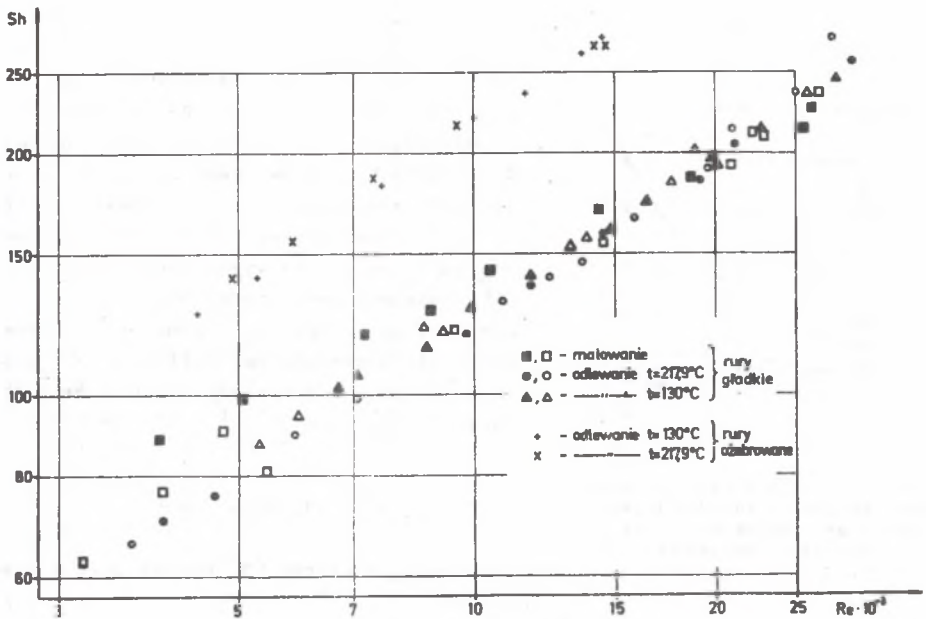
Temperatura odlewania powinna być wyższa od 130°C , co pozwala na uzyskanie odpowiedniej jakości elementu pomiarowego. W przypadku topienia naftalenu w naczyniu ogrzewanym wrzącą wodą konieczne jest podgrzewanie formy do temperatury ok. 80°C , gdyż zalewanie zimnej formy powoduje powstawanie nierówności i niejednorodności powierzchni.

Jeżeli próbka ma służyć do prowadzenia pomiarów rozkładu lokalnych wartości liczby Sherwooda, należy podgrzewać naftalen do temperatury wrzenia ($217,9^{\circ}\text{C}$) w celu odgazowania, co pozwala na otrzymanie odlewu o większej twardości i stałej gęstości.

W przypadku, gdy układ badany składa się z większej liczby elementów powtarzalnych (np. łożek rurowych), wystarczy badań jeden element czynny wykonany z C_{10}H_8 , natomiast pozostałe elementy modelujące postać geometryczną układu można wykonać przez odlewanie z parafiny. Czasem z uwagi na skomplikowany kształt próbki trudne jest wykonanie formy odlewniczej. Stosować wówczas można pokrywanie badanego elementu bądź przez malowanie próbki stopionym naftalenenem o temperaturze powyżej 130°C , bądź też poprzez natryskiwanie roztworem naftalenu w łatwo parującym rozpuszczalniku organicznym. Metoda ta, która pozwala, po odparowaniu rozpuszczalnika, uzyskać cienką i równomierną warstwę substancji opisana jest szeregowo w pracy [1]. Aby określić wpływ sposobu wykonania próbki na wartości średniego współczynnika wnikania masy, porównano wyniki badań szeregu próbek sporządzonych następującymi metodami:

- a) odlewanie w temperaturze wrzenia,
- b) odlewanie w temperaturze 130°C ,
- c) malowanie modelu stopionym naftalenenem,

Badanie prowadzono dla przestawnego łożka rur gładkich o podziałkach względnych $s_1/d = 1,59$ i $s_2/d = 1,364$ oraz dla przestawnego łożka ośbrowanego z żebrami wzdłużnymi skierowanymi pod kątem do kierunku osy niencki omywającego. Podziałki łożka: $s_1/d = 2$ i $s_2/d = 3,05$. W łożku rur gładkich przebadano po dwie próbki wykonane każdą z powyższych metod, natomiast w łożku ośbrowanym zbadano próbki wykonane metodą a i b. Wyniki pomiarów przedstawiono na wykresie rys. 1. Stwierdzono dużą zgodność wyników dla próbek wykonanych metodą a i b, przy czym sposób wykonania elementu pomiarowego nie wpływał istotnie na przebieg zmienności $Sh = f(Re)$. Natomiast dla elementu wykonanego metodą c zauważono znaczną, bo sięgającą 20%, rozbieżność wyników dla dwu przebadanych próbek. Wiąże się to z trudnościami w uzyskaniu omawianej metodą odpowiednio gładkiej i jedno-



Rys. 2. Zależność $Sh = f(Re)$ dla badanych układów

rodnej powierzchni nakładanej warstwy. Metodę tę, jako mniej wiarygodną, należy więc stosować jedynie w przypadku, kiedy zastosowanie innej technologii jest niemożliwe.

3. Wyznaczenie wartości średnich liczby Sherwooda

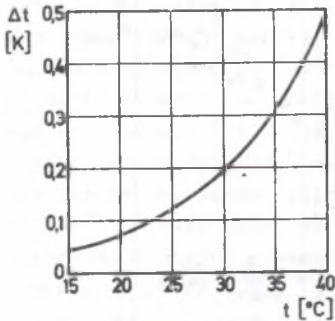
W celu określenia intensywności wnikania masy podczas sublimacji nadtalenu w strumieniu powietrza należy zmierzyć wielkości ΔG_2 , t , F , \bar{c} , d , p . Chcąc uzyskać zależność kryterialną typu:

$$Sh = C_m \cdot Re^m \cdot So^n, \quad (1)$$

należy jasno dokonać pomiaru charakterystycznej prędkości w . Prędkość ta zależy od typu omiwywania - np. w przypadku układów rur jest to prędkość w największym przekroju pęczka. Miarodajna dla intensywności wymiany masy jest temperatura zewnętrznej powierzchni nadtalenu t_A . Jest ona niższa od

temperatury strumienia powietrza na skutek zjawiska sublimacji, co w obliczeniach uwzględnia się przez odjęcie poprawki Δt .

$$t_A = t - \Delta t \quad (2)$$



Rys. 2. Spadek temperatury powierzchni sublimującego naftalenu omywanego strumieniem powietrza

Wielkość tej poprawki odczytywać można z wykresu Sogina [2] - rys. 2. Trzeba tu nadmienić, że dla uzyskania odpowiedniej dokładności pomiarów, konieczne jest wyznaczenie temperatury t_A z dokładnością do 0,1 K. Błąd pomiaru rzędu 1K pociąga bowiem za sobą błąd wyznaczania współczynnika wnikania masy rzędu 10%.

Znając temperaturę t_A wyznaczyć można ciśnienie nasycenia par naftalenu p_A^* , stosując najczęściej wykorzystywaną korelację Thomasa [3], [4]:

$$\lg p_A^* = 13,564 - \frac{3729,4}{T_A} \quad (3)$$

Ciśnienie we wzorze (3) podane jest w paskalach.

Inne zależności dla opisu p_A^* mogą dawać wyniki różniące się od (3) o 2-3% w zakresie temperatur 15 - 25°C.

Moduł napędowy wnikania masy oblicza się ze wzoru, którego słuszność udowodniono w pracy [3]:

$$\Delta \dot{m}_A = \frac{p_A^*}{p} \quad (4)$$

Współczynnik wnikania masy wyznaczyć można z równania definicyjnego:

$$\beta_A = \frac{\Delta G}{F \cdot \Delta \dot{m}_A \cdot \tau} \quad (5)$$

gdzie ΔG jest różnicą pomiarów masy próbki przed umieszczeniem w strumieniu powietrza i po czasie τ , podczas którego element badany był omywany powietrzem. Do pomiaru ubytku masy konieczna jest waga analityczna o dokładności co najmniej ± 1 mg.

Uwzględnianie błędu ΔG wynikającego z ubytku masy próbki na skutek konwekcji naturalnej podczas przemieszczenia i ważenia elementu nie jest konieczne. Stosując czasy pomiaru powyżej 6 minut uzyskuje się błąd ΔG mniejszy od 0,3%.

Dynamiczny współczynnik dyfuzji ζ_A wyznacza się wg [4] ze wzoru:

$$\zeta_A = \frac{D_{A0}}{v_0} M_A \sqrt{\frac{T_A}{273}} \quad (6)$$

lub po podstawieniu $M_A = 128 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$, $D_{A0} = 0,0185 \frac{\text{m}^2}{\text{h}}$, $v_0 = 22,4 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}$:

$$\zeta_A = 0,1057 \sqrt{\frac{T_A}{273}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{mh}} \right] \quad (7)$$

Uwzględniając powyższe obliczyć można liczbę Sherwooda jako:

$$\text{Sh} = \frac{\beta_A \cdot d}{\zeta_A} \quad (8)$$

Wykonując serię pomiarów dla różnych natężeń przepływu powietrza i opracowując wyniki metodą najmniejszych kwadratów otrzymuje się zależność kryterialną o postaci (1).

Występującą tutaj liczbę Schmidta wyznaczyć można ze wzorów definicyjnych:

$$\text{Sc} = \frac{m \cdot \eta}{\zeta_A} \quad (9)$$

lub

$$\text{Sc} = \frac{\vartheta}{D_A} \quad (10)$$

gdzie: M, η, ϑ , ze względu na niskie stężenie C_{10H_8} w mieszaninie, przyjmować należy jak dla powietrza.

Z obliczeń prowadzonych dla różnych wartości współczynników dyfuzji naftalenu w powietrzu i lepkości powietrza spotykanych w literaturze [1], [2], [5], [6] uzyskano, dla temperatur $t_A = 15 - 25^\circ\text{C}$, liczbę Schmidta równą:

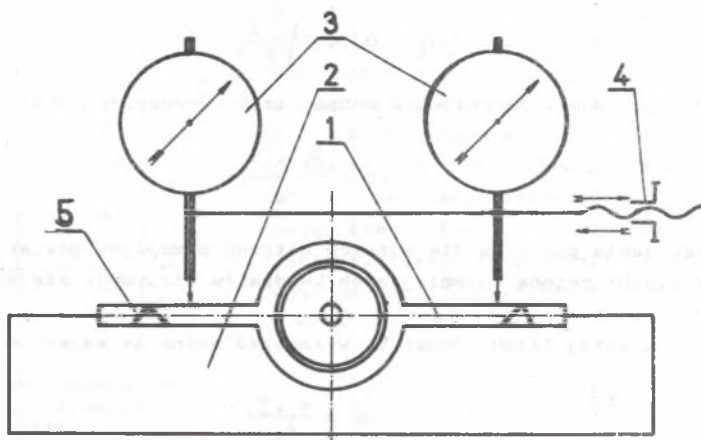
$$\text{Sc} = 2,6 \pm 0,05. \quad (11)$$

Na tej podstawie można w podanym przedziale temperatur przyjmować liczbę $\text{Sc} = 2,6$.

4. Wyznaczenie wartości lokalnych liczby Sherwooda

Rozkład współczynnika wnikania masy wyznacza się mierząc lokalne ubytki masy naftalenu wskutek sublimacji. Zestaw pomiarowy najkorzystniej jest zbudować w oparciu o czujniki zegarowe, umożliwiające osiągnięcie dokładności do 0,005 mm. Ponieważ dla uzyskania zmiany wymiarów o ok. 0,5 mm po-

trzeba kilku godzin pobytu próbki w wymienniku masy, należy zapewnić stałość parametrów (strumień powietrza, temperatura) przepływu. Dlatego dla uniknięcia wzrostu temperatury wskutek oddziaływania wentylatora dobrze jest umieścić kanał pomiarowy na ssaniu.



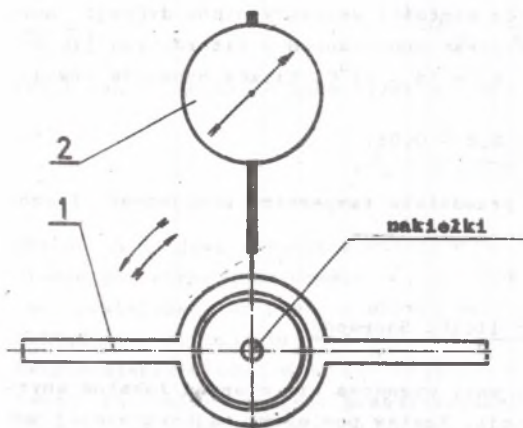
Rys. 3. Metoda odwzorowania kształtu powierzchni płaskiej

1 - badany element, 2 - połówka formy, 3 - ozujnik zegarowy, 4 - mechanizm posuwu, 5 - element rozprężny

Zmianę kształtu powierzchni płaskich (np. żeber) można wyznaczyć po umieszczeniu próbki w półkole formy odlewniczej.

Aby powierzchnia bazowa nie ulegała zmianie podczas sublimacji elementu pomiarowego, konieczne jest umieszczenie w formie metalowych elementów rozprężnych, które zalane naftalenem zachowują stały wymiar poprzeczny mimo ubytku objętości $C_{10}H_8$ - rys. 3.

Jeżeli element badany posiada powierzchnie obrotowe, należy zaopatrzyć go w nakiełki i mierzyć deformac-



Rys. 4. Metoda odwzorowania kształtu powierzchni cylindrycznej

1 - badany element, 2 - ozujnik zegarowy

cję po umieszczeniu elementu w kłach, określając zależność lokalnego ubytku masy od współrzędnej kątovej - rys. 4.

Zmiana kształtu przekroju elementu badanego pozwala określić miejscowe współczynniki wnikania masy:

$$\beta_{A1} = \frac{\Delta G_1}{F_1 \Delta x_A \cdot \xi} \quad (12)$$

Wzór ten można przekształcić do postaci:

$$\beta_{A1} = \frac{\Delta y_1 \cdot \rho_A}{\Delta x_A \cdot \xi} \quad (13)$$

Występująca tu wielkość ρ_A stanowi gęstość odlewu naftalenowego, która różni się od gęstości czystego $C_{10}H_8$ ze względu na obecność mikropęcherzyków powietrza. Gęstość ta zależy od temperatury odlewania - tablica 1.

Tablica 1

t_{odl}	$^{\circ}C$	100	130 + 150	217,9
ρ_A	$\frac{kg}{dm^3}$	$1,05 \pm 0,01$	$1,065 \pm 0,01$	$1,11 \pm 0,005$

Dzieląc stronami (13) przez (5) uzyskano zależność stosunku lokalnego i średniego współczynnika wnikania masy od danych pomiarowych

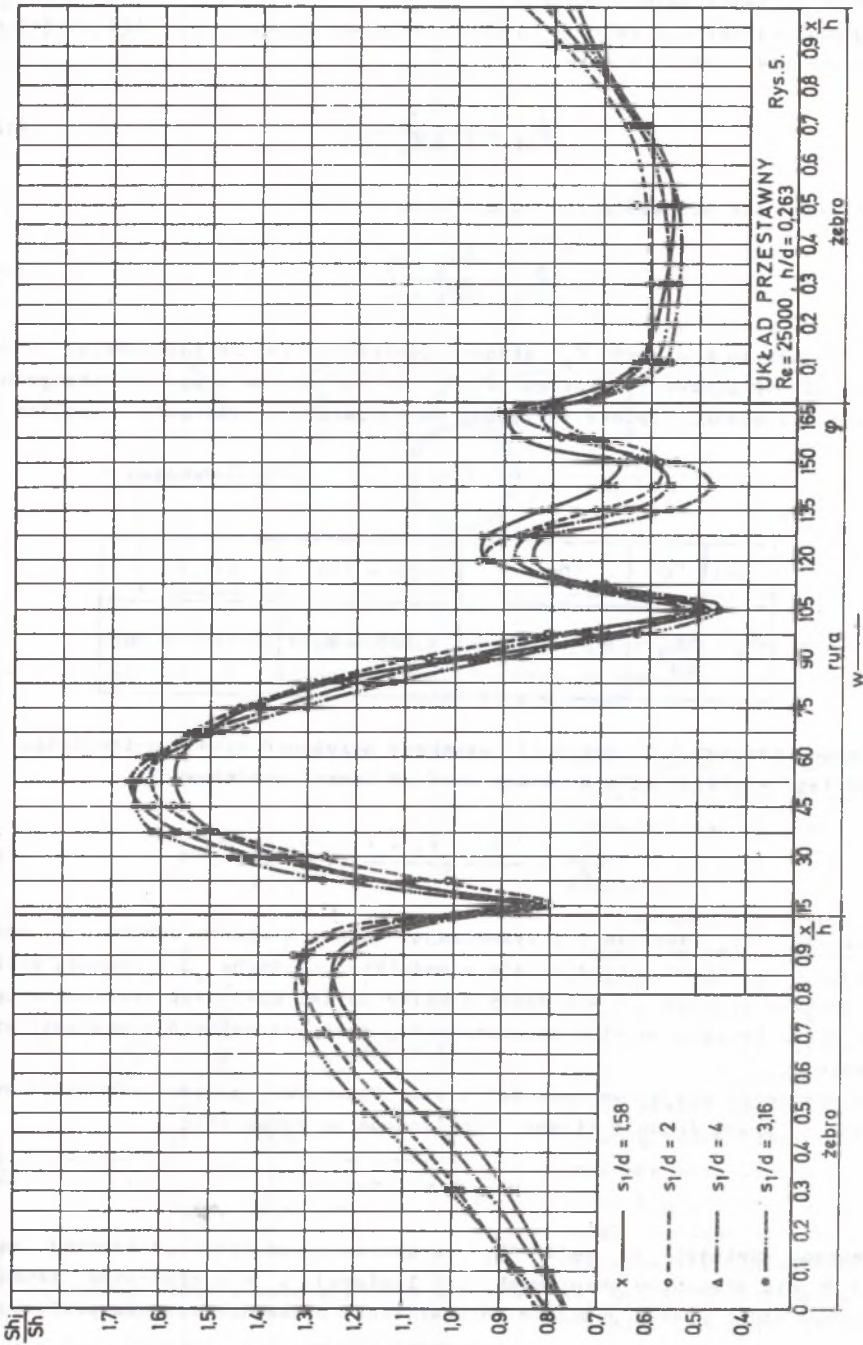
$$\frac{\beta_{A1}}{\beta_A} = \frac{\Delta y_1 \cdot \rho_A \cdot F}{\Delta G} = \frac{Sh_1}{Sh} = z \quad (14)$$

Wielkości Δy_1 określa się wyznaczając zmianę wymiarów próbki po osi ξ . Δy_1 należy określać dla niewielkich odcinków Δx_1 obwodu ciała, co pozwala przyjmując, że zmierzony lokalny ubytek masy jest stały na długości Δx_1 . Uzyskane wyniki najkorzystniej jest przedstawić w postaci graficznej.

Aby wyznaczyć miejscowe wartości liczby Sherwooda, należy przemnożyć wartość z przez średnią liczbę Sh liczoną ze wzoru (8):

$$Sh_1 = z \cdot Sh \quad (15)$$

Nanosząc wartości x_1 bądź Sh_1 na wykres w funkcji współrzędnej kątovej φ dla elementów obrotowych, lub liniowej x dla elementów płaskich uzyskać można krzywą rozkładu intensywności wnikania masy na powierzchni



Rys. 5. Rozkład współczynnika wnicania masy dla powtarzalnego elementu konwekcyjnego pęczka membranowego

próbki. Dla przykładu na rys. 5 podano rozkład współczynnika wnikania masy na powierzchni próbki o kształcie jak na rys. 3 i 4. Próbka stanowi w tym wypadku element powtarzalny konwekcyjnych pęczków membranowych o układzie przestawnym. Parametry geometryczne układu podano na rysunku. Badania prowadzono dla $Re = 25\ 000$.

Oznaczenia

a	- współczynnik wyrównania temperatury
C	- stała
d [m]	- wymiar charakterystyczny
D_A [m^2/h]	- kinematyczny współczynnik dyfuzji
D_{A0} [m^2/h]	- kinematyczny współczynnik dyfuzji dla warunków normalnych
F [m^2]	- powierzchnia
ΔG kg	- ubytek masy badanego elementu
$m - M_A/M$	- stosunek mas molowych
M [kg/kmol]	- masa molowa powietrza
M_A [kg/kmol]	- masa molowa naftalenu
p [Pa]	- ciśnienie
p_A^* [Pa]	- ciśnienie nasycenia pary naftalenu
t [$^{\circ}C$]	- temperatura
T [$^{\circ}K$]	- temperatura bezwzględna
v_0 [$\frac{m^3}{kmol}$]	- objętość molowa dla warunków normalnych
w [m/s]	- prędkość
Δx [m]	- odległość między sąsiednimi pomiarami
Δy [m]	- lokalna grubość ubytku masy
β_A [kg/m ² h]	- współczynnik wnikania masy
δ_A [kg/mh]	- dynamiczny współczynnik dyfuzji
η [kg/mh]	- dynamiczny współczynnik lepkości
ν [m ² /h]	- kinematyczny współczynnik lepkości
$\Delta \pi_A$	- moduł napędowy dyfuzji
ρ_A [kg/m ³]	- gęstość naftalenu
τ [h]	- czas

Indeksy

m	- dla wymiany masy
q	- dla wymiany ciepła
\dot{z}	- wartość lokalna

LITERATURA

- [1] Neal S.B.H.C.: The development of the thin-film naphthalene mass transfer analogue technique for the direct measurement of heat transfer coefficients, *Int. J. Heat Mass Transfer* 18, (1975).
- [2] Bogusławski L., Dubaniewicz E., Popiel Cz.: Pomiarы konwekcyjnej wymiany masy w uderzających strumieniach techniką sublimującego naphthalenu. Referaty sympozjum wymiany ciepła i masy. Warszawa - Jabłonna, 1976.
- [3] Smyczek H., Zabłocki J.: Wnikanie masy w przepływie prostym gazu do układu rur. *Inżynieria Chemiczna V*, 1, 143, (1975).
- [4] Hobler T.: *Dyfuzyjny ruch masy i absorbery*. WNT, Warszawa 1976.
- [5] Bošnjaković F.: *Technische Thermodynamik*. Verlag Theodor Steinkopff, Dresden 1972.
- [6] Vargaftik N.B.: *Spravočnik po teplofizičeskim svojstvam gazov i židkостей*. Nauka, Moskwa 1972.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Władysław Nowak

Wpłynęło do Redakcji w sierpniu 1982 r.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МАССООТДАЧИ
МЕТОДОМ СУБЛИМАЦИИ НАФТАЛИНА

Р е з ю м е

В работе представлен способ проведения измерений коэффициента массоотдачи во время сублимации нафталина обмываемого потоком воздуха в конвекционных обменниках разного типа. Было определено влияние метода изготовления пробы на результаты измерений, а также зависимость между температурой отливки и плотностью нафталиновой отливки. Исследования велись для шахматного пучка гладких труб и для шахматного пучка ребристых труб с продольными ребрами расположенными под углом к направлению обмываемого агента. Был представлен общий алгоритм определения средних и местных чисел Шервуда для рассматриваемого случая массообмена.

RESEARCH INTO THE MASS TRANSFER COEFFICIENTS WITH THE HELP
OF THE NAPHTHALENE SUBLIMATION METHOD

S u m m a r y

A measurement technique of the mass transfer coefficients during naphthalene sublimation to the air in convective exchangers has been presented. The influence of the way of producing a sample on the investigation

results has been determined. Data showing variation in the naphthalene cast density as a function of casting temperature have been presented. The investigations have been carried out on a bundle of smooth pipes and on a bundle of ribbed pipes with longitudinal ribs placed at an angle to the direction of a washing agent. An algorithm for calculating mean and local Sherwood numbers has been developed.