

P O L S K A   A K A D E M I A   N A U K  
INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

PRACE  
INSTYTUTU MASZYN  
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS  
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

76

WARSZAWA-POZNAŃ 1978

---

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

---

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPLYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

\*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW  
MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

---

KOMITET REDAKCYJNY — EXECUTIVE EDITORS  
KAZIMIERZ STELLER — REDAKTOR — EDITOR  
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ . ZENON ZAKRZEWSKI  
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA — EDITORIAL OFFICE  
Instytut Maszyn Przepływowych PAN,  
80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, ul. Gen. Józefa Fiszerza 14, tel. 41-12-71

Copyright  
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe  
Warszawa 1978  
Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 340+90 egz.	Oddano do składania 27 lutego 1978 r.
Ark. wyd. 12,25. Ark. druk. 9,375	Podpisano do druku 24 października 1978 r.
Papier druk. sat. kl. V, 70 g, 70×100 cm.	Druk ukończono w październiku 1978 r.
Nr zam. 319/98. J-14/662.	Cena zł 40,-

DRUKARNIA UNIWERSYTETU IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU

BRUNON GROCHAL, WŁADYSŁAW TARASEWICZ

Gdańsk

**Badanie wnikania ciepła przy kondensacji czterotlenku azotu na poziomej rurze gładkiej i żebrowanej\***

W pracy przedstawiono wyniki wstępnych badań eksperymentalnych skraplania pary czterotlenku azotu  $N_2O_4$  na poziomych rurach, jednej gładkiej i jednej żebrowanej. Wyniki eksperymentu są zgodne z wynikami nielicznych wcześniejszych badań, przeprowadzonych w ZSRR.

**Spis oznaczeń**

$c_p$ – izobaryczne ciepło właściwe,	$r$ – ciepło parowania,
$C$ – stała,	$t$ – temperatura,
$D$ – średnica,	$\alpha$ – współczynnik przejmowania ciepła,
$F$ – powierzchnia,	$\Delta$ – różnica temperatur.
$\dot{m}$ – masowe natężenie przepływu,	

Indeksy dotyczą:

cz – badanego czynnika,	s – stanu nasycenia,
0 – rury gładkiej lub rury żebrowanej po myślowym usunięciu żeber (rury podstawowej),	w – wody chłodzącej; średnicy wewnętrznej rury,
z – powierzchni całkowitej rury żebrowanej,	wl – wlotu,
	wyl – wylotu.

**Wstęp**

Znalezienie odpowiedniego czynnika roboczego staje się jednym z zasadniczych problemów współczesnej energetyki cieplnej. W istocie swej sprowadza się do szukania takiego czynnika, który pozwoliłby przekroczyć wskaźniki ekonomiczne osiągnięte przy użyciu pary wodnej.

Jednym z rozwiązań może być stosowanie jako czynnika roboczego mieszanin dysocjujących [1], tj. substancji, w których zachodzą odwracalne reakcje chemiczne z towarzyszącymi im efektami cieplnymi i zmianą liczby cząstek. Wzrost liczby cząstek przy ogrzewaniu i jej zmniejszanie się podczas chłodzenia podnosi sprawność termodynamiczną obiegu, a ciepło z zachodzących reakcji chemicznych poprawia ciepłno-fizyczne własności mieszaniny, intensyfikując ruch ciepła wskutek wytworzonej dyfuzji stężeniowej.

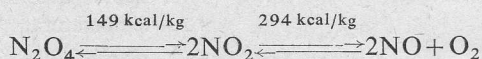
\* Praca wykonana w ramach problemu resortowego PAN-19, grupa tematyczna 3.



Dzięki tym procesom można znacznie zmniejszyć (w stosunku do konwencjonalnych) zarówno gabaryty reaktorów jądrowych chłodzonych gazami dysocjującymi, jak i wymiary napędzanych nimi turbin i współpracujących wymienników ciepła. Z dużej grupy znanych chemicznie reagujących substancji najlepiej przebadano pod względem termodynamicznym czterotlenek azotu, który w roli czynnika roboczego wykazuje szereg zalet w porównaniu z parą wodną w obiegach siłowni cieplnych atomowych i konwencjonalnych, a w reaktorach na szybkie neutrony w porównaniu z używanym tam ciekłym sodem metalicznym.

Zakład Termodynamiki i Wymiany Ciepła IMP PAN, zajmujący się przemianami cieplnymi w urządzeniach energetycznych, podjął badania przy użyciu czterotlenku azotu, jako perspektywicznego dysocjującego czynnika roboczego siłowni. Przy tym zainteresowania skierowano głównie na wymianę ciepła przy zmianach fazowych, tj. przy wrzeniu i skraplaniu, rozpoczynając od wstępnego eksperymentalnego rozeznania wnikania ciepła przy kondensacji. Kondensacja mieszaniny dysocjującej wykazuje specyficzne właściwości, w porównaniu z kondensacją par jednoskładnikowych, co z kolei oddziałuje na wielkość współczynnika wnikania ciepła.

Różnice te wypływają głównie z dwóch zjawisk istnienia różnych temperatur nasycenia pojedynczych składników chemicznie reagującej mieszaniny oraz występowania efektów cieplnych wskutek zachodzenia reakcji chemicznej. W odniesieniu do układu czterotlenku azotu, dysocjującego według schematu



temperatury nasycenia przy ciśnieniu normalnym wynoszą odpowiednio:

$$\text{dla } \text{N}_2\text{O}_4 \rightleftharpoons 2\text{NO}_2 \quad +21,15^\circ\text{C}$$

$$\text{dla } \text{NO} \quad -141,8^\circ\text{C}$$

$$\text{dla } \text{O}_2 \quad -182,13^\circ\text{C}$$

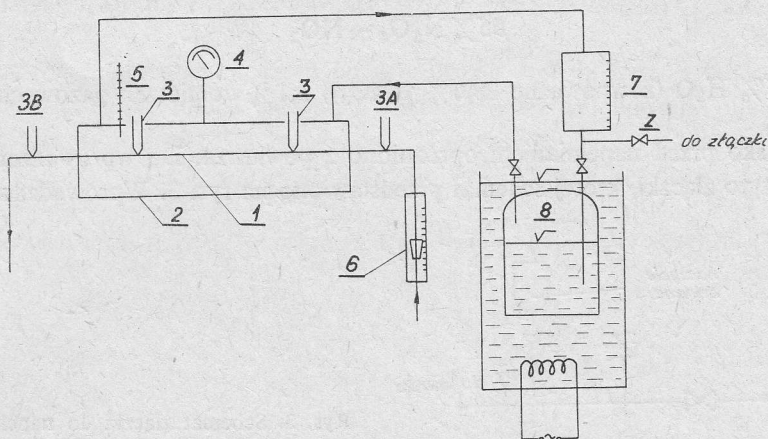
Ciepło reakcji I stopnia wynosi 149 kcal/kg, II stopnia 294 kcal/kg, a ciepło parowania w temperaturze  $+26,85^\circ\text{C}$  wynosi 100,6 kcal/kg. Skraplanie czterotlenku azotu, zachodzące z asocjacją składników, odbywa się w obecności gazów NO i  $\text{O}_2$  przy ich koncentracji zależnej od temperatury i kinetyki przebiegających reakcji.

### Opis stanowiska doświadczalnego

Badania kondensacji czterotlenku azotu wykonano na pojedynczych poziomych rurach, jednej żebrowanej i jednej gładkiej, na adaptowanym stanowisku używanym uprzednio do doświadczeń skraplania pary freonu 21 [4]. Schemat stanowiska przedstawiono na rys. 1. Odparowanie czynnika następuje ze zbiornika 8 zanurzonego w wodzie podgrzewanej grzałkami o regulowanej mocy. Ze zbiornika 8 para dopływa przewodem do korpusu skraplacza 2 z czterema oknami wziernikowymi. Do rury 1 o długości około 600 mm przypawane są termopary miedź-konstantan\*). Temperaturę zewnętrzną po-

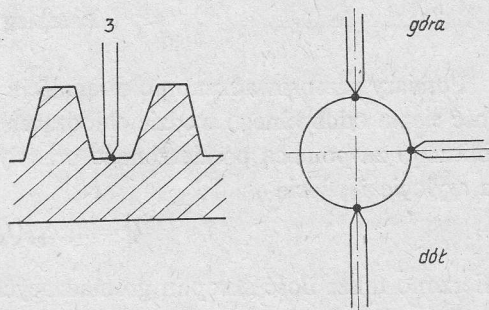
\*) U podstawy żeber (na powierzchni rury podstawowej).

wierzchni rury mierzono w dwóch przekrojach, 3; rozmieszczenie termopar pokazano na rys. 2. Dwie termopary oraz termometr rtęciowy 5 wskazywały temperaturę pary (temperaturę nasycenia). Ciśnienie pary w korpusie skraplacza odczytywano na manometrze 4.



Rys. 1. Schemat stanowiska doświadczenia do badania wymiany ciepła przy skraplaniu pary na pojedynczej rurze

Na rurze 1 następowało skraplanie pary. Wydzielone ciepło skraplania przejmowała płynąca wewnątrz rury woda chłodząca. Jej temperaturę na wlocie (3A) i wylocie (3B) mierzono termoparami, a natężenie przepływu rotametrem 6. Za pomocą naczynia pomiarowego 7 określano natężenie przepływu skroplin, które następnie spływały do zbiornika 8 i zamykały w ten sposób obieg czynnika w stanowisku doświadczalnym.



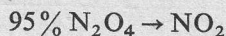
Rys. 2. Usytuowanie termopar mierzących temperaturę zewnętrznej powierzchni rury

Ponieważ stanowisko nie było przystosowane do dłuższych badań mediów agresywnych, przed przystąpieniem do badań sprawdzono, czy jego elementy zachowują sprawność działania przez okres niezbędny dla przeprowadzenia pomiarów. Założono, że w trakcie badań niektóre jego części składowe mogą ulec uszkodzeniom, jednak stopień ich zniszczenia nie powinien przekroczyć dopuszczalnego ze względu na bezpieczeństwo obsługi (tlenki azotu są substancjami wysoce niebezpiecznymi dla życia).

Do pomiarów temperatury używano termopar miedź-konstantan z gołych drutów, zgrzewanych oporowo do rury.

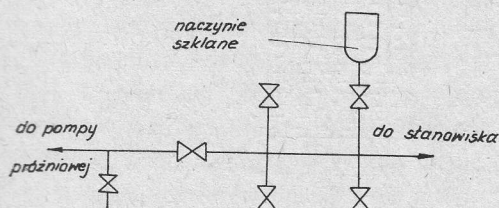
### Napełnianie stanowiska

Badania przeprowadzono używając czterotlenku azotu o sprawdzonym składzie



2,9%  $\text{H}_2\text{O}$  (równoważne 20,6%  $\text{HNO}_3$ ), 2,1% domieszek gazowych.

Stanowisko przed napełnianiem opróżniono z powietrza. Do wprowadzenia ciekłego czynnika użyto złączki, której schemat przedstawiono na rys. 3. Wprowadzanie czynnika



Rys. 3. Schemat złączki do napełniania stanowiska

odbywało się porcjami, odpowiadającymi pojemności szklanego naczynia. Po napełnieniu naczynia otwierano zawór Z1 i czynnik był wysany do stanowiska. Zawór Z1 przykręcano przed całkowitym opróżnieniem naczynia tak, że cały czas istniało zamknięcie hydrauliczne stanowiska.

### Przebieg pomiarów

Pomiary przeprowadzano po osiągnięciu stanu ustalonego przy żądanych parametrach. Ilość ciepła oddawanego wodzie chłodzącej przez skraplającą się parę czterotlenku azotu, obliczano za pomocą pomierzonego przepływu wody chłodzącej i różnicy jej temperatur na wylocie i wlocie

$$\dot{Q} = \dot{m}_w c_{pw} (t_{w \text{ wyl}} - t_{w \text{ wli}}) \quad (1)$$

Mierzono także ilość kropli gromadzących się w zbiorniku pomiarowym, co wyznacza ciepło oddawane przez czterotlenek azotu podczas kondensacji

$$\dot{Q} = \dot{m}_{cz} r \quad (2)$$

Współczynnik przejmowania ciepła obliczano ze wzoru

$$\alpha = \frac{\dot{Q}}{F(t_s - \bar{t}_{sc})} \quad (3)$$

gdzie  $\dot{Q}$  otrzymywano z (1), a za  $\bar{t}_{sc}$  przyjmowano średnią arytmetyczną temperaturę zewnętrznej powierzchni rury u podstawy żeber.



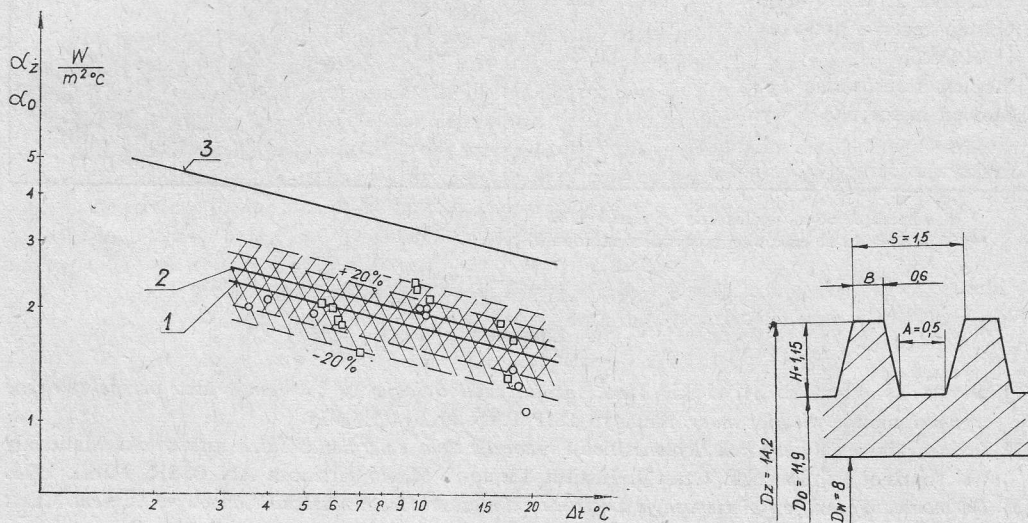
## Wyniki pomiarów

Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 4, na którym podano również charakterystyczne wymiary ożebrowania rury żebrowanej, oraz w tabeli 1. Wnioski z pomiarów są następujące:

1. Skraplanie pary czterotlenku azotu na żebrowanej poziomej rurze można opisać zależnością analogiczną do znanej zależności podanej przez W. Nusselta dla gładkiej poziomej rury, tzn. w postaci

$$\alpha = C(\Delta t)^{-0,25}, \quad (4)$$

gdzie  $C$  ujmuje własności fizyczne substancji oraz wpływ wymiarów ożebrowania.



Rys. 4. Wyniki pomiarów

Krzywa 1 (○) – wyniki pomiarów na rurze gładkiej przeliczone na średnicę  $D_0 = 11,9$  mm (w rzeczywistości rura miała średnicę  $D_0 = 14$  mm), krzywa 2 (□) – wyniki pomiarów na rurze żebrowanej o średnicy u podstawy żebrowania  $D_0 = 11,9$  mm (wymiary żebrowania w mm podano na szkicu obok wykresu), krzywa 3 – zależność  $\alpha = C(\Delta t)^{-0,25}$  dla rury gładkiej o średnicy  $D_0 = 11,9$  mm, obliczona dla  $t_s = 40^\circ\text{C}$  według własności fizycznych czterotlenku azotu podanych w [3]. Rura ze zwykłej stali węglowej, żebra nacinanane na tokarce,  $L = 600$  mm

2. Intensyfikacja przyjmowania ciepła przy kondensacji czterotlenku azotu na żebrowanej rurze w stosunku do gładkiej rury jest nieznaczna. Współczynnik intensyfikacji ( $\alpha_z/\alpha_0$ ) obliczony według znanej formuły Beatty'ego i Katza [6] jest dla zbadanej rury żebrowanej równy  $(D_0/D_E)^{0,25} = 1,48$ . Z pomiarów dla czterotlenku azotu otrzymano  $(\alpha_z/\alpha_0) \cong 1,10$ , a dla freonu 21 na tej samej rurze uzyskano  $(\alpha_z/\alpha_0) \cong 1,59$  [7]. Jak wynika z tabeli 1, otrzymany dla czterotlenku azotu rezultat pokrywa się z rezultatami badań radzieckich, a osiągnięte efektywności rur żebrowanych zależą w głównej mierze od stopnia rozwinięcia powierzchni.

Tabela 1

Zestawienie wyników badań kondensacji  $N_2O_4$  na zebrowanych rurach

Badane parametry	Badania radzieckie			Badania własne
Nr rury, źródło	1 [2]	2 [2]	3 [2]	
Zakres ciśnień [bar]	1,5 - 10	1,5 - 6	1,2 - 10	1,5 - 4
Zakres różnic temperatur $\Delta t$ [°C]	4 - 25	4 - 25	3 - 16	4 - 20
Zakres gęstości strumienia cieplnego $q$ [kW/m <sup>2</sup> ]	37 - 190	24 - 175	29 - 136	11 - 31**
Średnica $D_w$ [mm]	7,86	7,86	20	8
Średnica $D_o$ [mm]	9,18	9,18	22,4	11,9
Wysokość żeber $H$ [mm]	0,5	0,5	1,3	1,15
Podziałka żeber $S$ [mm]	1,02	1,02	1,0	1,5
Odstęp żeber u podstawy $A$ [mm]	0,53	0,53	0,6	0,5
Stopień ożebrowania $F_z/F_o$	2,07	2,06	3,75	2,52
Stopień intensyfikacji wymiany ciepła $\alpha_z/\alpha_o$	1,12	1,12	0,82	1,10*
Efektywność rury $(\alpha_z F_z)/(\alpha_o F_o)$	2,33	2,33	3,1	2,77

\* W odniesieniu do  $\alpha_o$  według krzywej 1 na rys. 4.

\*\* W odniesieniu do całkowitej powierzchni zebrowanej rury.

## Literatura

- [1] W. Tarasewicz, E. Śliwicki, *Tlenki azotu, czyli dysocjujące substancje jako perspektywiczne czynniki silowni wielkiej mocy*. Biuletyn IMP PAN nr 81/751/1974.
- [2] *Dissociirujuszczije gazy kak tieplonositeli i raboczije tiela energieticzeskich ustanowok*. Materiały Wsiesojuznoj konferencii. Czast I, Institut Tieplo- i Massopierienosa AN BSSR, Minsk 1973.
- [3] *Tiermodinamiczeskije i pierienosnyje swojstwa chemiczeski rieagirujuszczich gazowych sistiem*. Czast I, Izd. „Nauka i technika”, Minsk 1971. Pod. red. A. K. Krasina i W. W. Niestierenko.
- [4] B. Grochal, *Skraplanie pary na nachylonej zebrowanej rurze — opis stanowiska doświadczalnego i wyniki wstepnych badan*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 172/73.
- [5] I. I. Gogonin, A. R. Dorochow, *Tieplootdacza pri kondensacii frieona-21 na gorizontalnych trubach*. Chłodilnaja technika 11/1970, s. 31 - 34.
- [6] K. O. Beatty, Jr., D. L. Katz, *Condensation of Vapors on Outside of Finned Tubes*. Chemical Engineering Progress, vol. 44, No. 1/January 1948, pp. 55 - 70.
- [7] B. Grochal, *Badanie procesu wymiany ciepła przy skraplaniu freonu 21 oraz metod intensyfikacji tej wymiany*. Praca doktorska, Politechnika Gdańska, styczeń 1976.

### Исследование проникания тепла при конденсации четырёхокси азота на горизонтальной гладкой и ребристой трубах

## Резюме

В работе представлены: описание экспериментального стенда и результаты произведенных на этом стенде исследований конденсации четырёхокси азота ( $N_2O_4$ ) на горизонтальных одиночных гладкой и ребристой трубах. Схема стенда представлена на рис. 2.



Коэффициент проникания тепла  $\alpha$  определяется по формуле (3), в которой  $F$  обозначает поверхность, а  $t_{sc}$  является средней температурой внешней поверхности трубы из значений температур измеряемых термопарами медь-константан. Тепло  $Q$  определяется из (1) и контролируется по (2). Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_0$  определен для поверхности  $F_0$  основной трубы (после мнимого устранения ребер), а  $\alpha_z$  для полной поверхности ребристой трубы  $F_z$ . Расхождения не превышали 10% (за исключением двух замеров).

Результаты исследований показаны на рис. 4. В таблице 1 представлено сравнение собственных и советских (по [2]) результатов исследований произведенных на ребристых трубах.

## Investigations of Heat Penetration During the Condensation of Nitric Tetraoxide on a Horizontal Smooth or Ribbed Tube

### Summary

The paper contains a description of an experimental stand and results of investigations, carried out on this stand, of the condensation of nitric tetraoxide ( $N_2O_4$ ) vapor on horizontal smooth or ribbed tubes. The diagrammatical arrangement of the stand is shown in Fig. 2.

The heat transfer coefficient  $\alpha$  was determined basing on formula (3), where  $F$  denotes surface area and  $t_{sc}$  is the mean temperature of the external tube surface taken from measurements made with Cu-Ko thermocouples. Heat  $Q$  was determined from (1) and checked according to (2). The coefficient  $\alpha_0$  was determined for the area  $F_0$  of the basic tube (regarded as a smooth one), while  $\alpha_z$  was determined for the total surface area  $F_z$  of the ribbed tube. Discrepancies did not exceed 10% (except for two measurements).

The results of investigations are shown in Fig. 4. Table 1 gives a comparison of the results for ribbed tubes as obtained by the authors of this paper with data from Soviet sources [2].