

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
I N S T Y T U T M A S Z Y N P R Z E P Ł Y W O W Y C H

**PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPLYWOWYCH**

**TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY**

61

WARSZAWA—POZNAŃ 1973

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
JÓZEF ŚMIGIELSKI · ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA - EDITORIAL OFFICE
Instytut Maszyn Przepływowych PAN, 80-952 Gdańsk
ul. Gen. J. Fiszer 14, tel. 41-12-71

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1973

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE - ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 410+90 egz.

Oddano do składania 22 VIII 1972 r.

Ark. wyd. 9,0. Ark. druk. 7,5

Podpisano do druku 14 III 1973 r.

Pap. druk. sat. kl. V, 62 g

Druk ukończono w marcu 1973 r.

Nr zam. 554/128

D-4/155. Cena zł 27,-

DRUKARNIA UNIWERSYTETU IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

BOGDAN SEDLER, BRUNON GROCHAL

Gdańsk

Badania eksperymentalne kondensacji pary freonu-21

Praca zawiera wyniki badań współczynników przejmowania ciepła podczas kondensacji pary freonu-21.

Badania prowadzone były na stanowisku doświadczalnym Zakładu Termodynamiki i Wymiany Ciepła IMP PAN. Proces kondensacji par freonu-21 odbywał się na zewnątrz rurek mosiężnych żebrowanych, chłodzonych wewnątrz wodą. Otrzymane wyniki naniesiono na wykres w zależności od różnicy temperatur pomiędzy czynnikiem skraplanym a ścianką zewnętrzną rury.

Stwierdzono fakt intensyfikacji przejmowania ciepła po stronie skraplanej pary freonu-21 przy stosowaniu rur żebrowanych.

Rezultaty doświadczeń porównano z wynikami otrzymanymi przez innych autorów.

Wykaz oznaczeń

d, D – średnica [m],
 F – powierzchnia [m²],
 k – współczynnik przenikania ciepła [W/m² °C],
 n – ilość poziomych rur w pionowym rzędzie [–],
 \dot{Q} – ciepło przekazywane w jednostce czasu [W],
 t – temperatura [°C],
 w – prędkość [m/s],
 α – współczynnik przejmowania ciepła [W/m² °C],
 γ – ciężar właściwy [N/m³],
 Δ – różnica, spadek [–],
 $\bar{\varepsilon}$ – współczynnik poprawkowy [–],

λ – przewodnictwo cieplne [W/m°C],
 Nu – liczba Nusselta [–],
 Pr – liczba Prandla [–],
 Re – liczba Reynoldsa [–].

Indeksy dotyczą

L – logarytmicznej (powierzchni, różnicy temperatur),
 O – całkowitej powierzchni zewnętrznej,
 PZ – podstawy żeber,
 S – pary nasyconej,
 SC – ścianki rury,
 W – wewnętrznej średnicy, strony wodnej,
 Z – zewnętrznej średnicy.

1. Cel badań

Czynniki niskowrzące, stosowane dotąd powszechnie w technice chłodniczej, stały się obecnie ponownie przedmiotem zainteresowania w związku z możliwościami zastosowania ich w obiegu niskotemperaturowym siłowni dwuczynnikowej [1].

Jednym z problemów, związanych z wprowadzaniem czynników niskowrzących jako czynników roboczych w energetyce, jest intensyfikacja przejmowania ciepła, także przy skraplaniu [1]. Przyczyną takiego stanu rzeczy są niekorzystne właściwości czynników niskowrzących z punktu widzenia wymiany ciepła [3]. Wiele względów przemawia za tym, że jednym z lepszych czynników roboczych w obiegu niskotemperaturowym będzie freon-21 [1, 2]. Z tego powodu czynnik ten jest przedmiotem zainteresowania – poza Instytutem Maszyn Przepływowych PAN – także w innych ośrodkach zajmujących się badaniami związanymi z koncepcją siłowni dwuczynnikowej [4, 5].

W związku z tym na stanowisku eksperymentalnym do badania wymiany ciepła i oporów przepływu w IMP PAN przeprowadzono badania doświadczalne wymiany ciepła podczas kondensacji pary freonu-21.

Celem badań było znalezienie współczynników przejmowania ciepła przy kondensacji freonu-21 na rurze żebrowanej i porównanie z wynikami otrzymanymi przez innych autorów [4, 5], jak również sprawdzenie zależności teoretycznych. W technice chłodniczej z zasady stosuje się rozwinięcie powierzchni po stronie skraplanej pary, najczęściej w postaci nawalcowania na zewnętrznej powierzchni rur tzw. „niskich” żeber [6]. Takich właśnie rur użyto do budowy eksperymentalnego skraplacza.

W pracy [7] podano szereg metod intensyfikacji przejmowania ciepła przy skraplaniu. Spośród nich, metoda polegająca na zastosowaniu rur z nawalcowanymi poprzecznym niskimi żebrami wydaje się mieć najwięcej perspektywy, jeżeli chodzi o zastosowanie w dużych skraplaczach czynnika niskowrzącego w siłowni dwuczynnikowej. Jak wykazano [8], przy odpowiednim doborze kształtu żeber, poza zwiększeniem powierzchni można się spodziewać także wzrostu współczynnika przejmowania ciepła α na skutek efektu oddziaływania sił napięcia powierzchniowego.

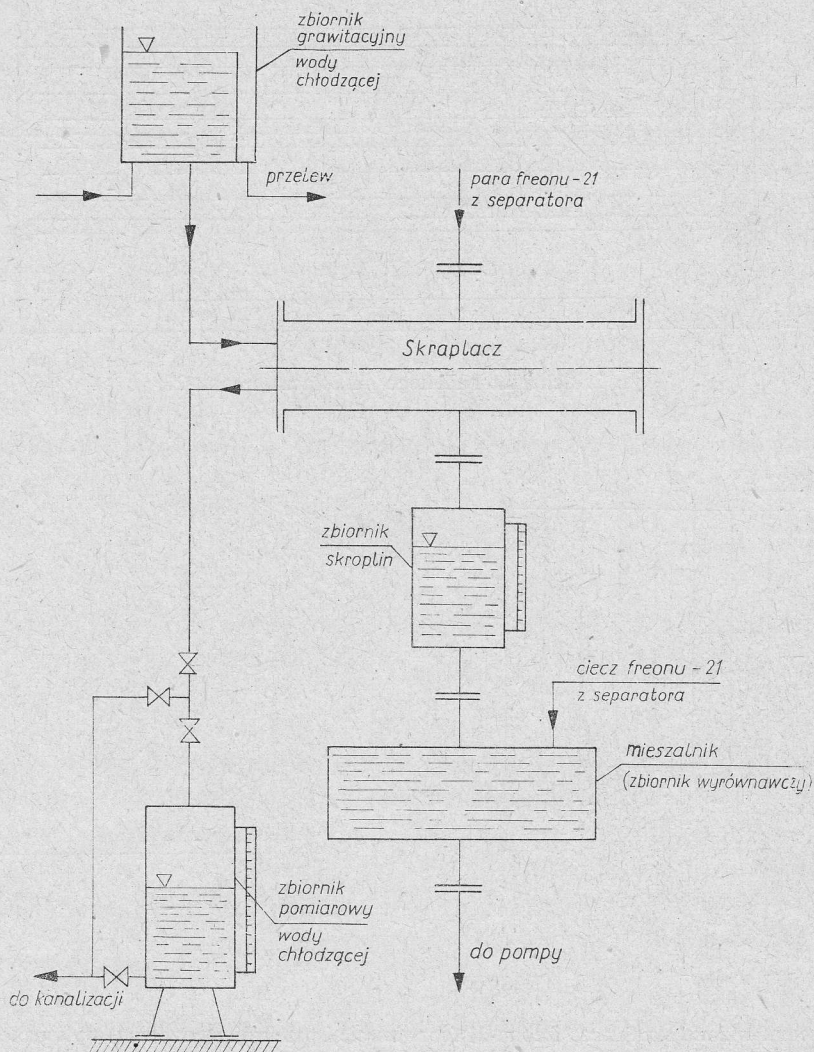
2. Opis stoiska doświadczalnego

Badania wymiany ciepła przy skraplaniu par freonu-21 przeprowadzono na stoisku doświadczalnym, przedstawionym schematycznie na rys. 1.

Woda chłodząca skraplacz była pobierana z grawitacyjnego zbiornika wyrównawczego, w celu zapewnienia stałości natężenia przepływu wody (prędkości wody w rurze) w trakcie pomiaru. Natężenie przepływu wody chłodzącej skraplacz mierzono wyskalowanym zbiornikiem pomiarowym. Para freonu płynęła do skraplacza z separatora cyklonowego, zainstalowanego za parownikiem, którego opis nie wchodzi w zakres niniejszej pracy.

Kondensat freonu-21 ściekał ze skraplacza do zbiornika kondensatu, a stąd do zbiornika wyrównawczego. Schemat badanego skraplacza z zaznaczonymi punktami pomiarowymi przedstawiony jest na rys. 2.

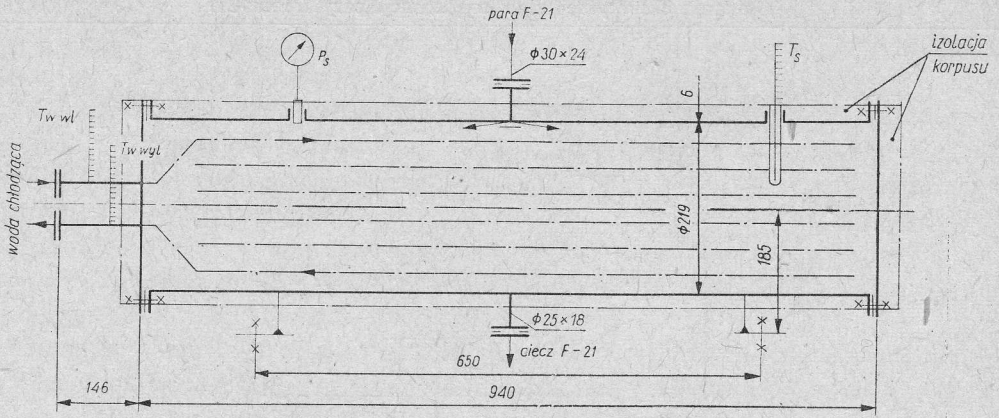
Obudowę usytuowanego poziomo skraplacza stanowił korpus z okrągłej stalowej rury o średnicy wewnętrznej $d_w = 219$ mm i długości 940 mm. Płaszcz skraplacza był izolowany z zewnątrz tkaniną azbestową. Dwie pokrywy przykręcane śrubami zamykały korpus z obu stron. Przez jedną z pokryw przechodziły dwie rury: doprowadzająca i odprowadzająca wodę do chłodzenia skraplacza. Pokrywy także zaizolowano tkaniną azbe-



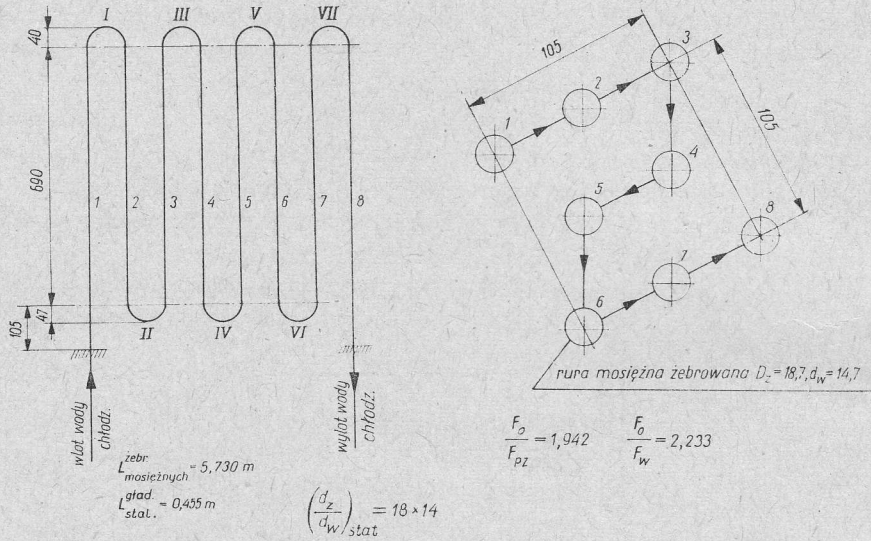
Rys. 1. Schemat stanowiska do badania kondensacji pary freonu-21

stową. Króciec dolotowy pary freonu-21 o $d_w = 24$ mm był osadzony w połowie długości płaszczu na górnej tworzącej. Bezpośrednio na wlocie zainstalowano płytkę, wyhamowującą strumień pary płynącej z króćca dolotowego. Króciec odprowadzający skropliny pary freonu o $d_w = 18$ mm ($25 \times 3,5$) umieszczono w połowie długości płaszczu na dolnej tworzącej. Wszystkie złącza kołnierzowe uszczelniano podkładkami z klingerytu.

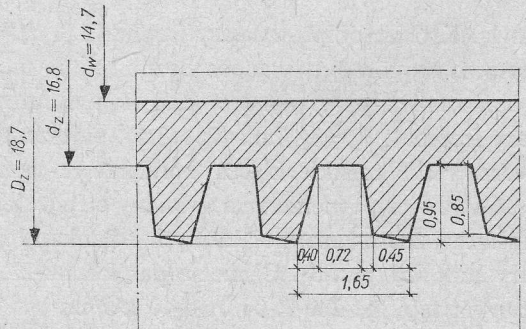
Całkowita powierzchnia wymiany ciepła składała się z ośmiu prostych odcinków rury mosiężnej żebrowanej połączonych kolankami w kształcie litery U, wykonanymi z gładkiej rury stalowej (rys. 3). Ciśnienie par freonu-21 w skraplaczu mierzono manometrem tarczowym typu M-200-R-04/01-0-40 kG/cm², a temperaturę termometrem laboratoryjnym o najmniejszej podziałce 0,1°C, osadzonym w tulejce mosiężnej. Wpuszczona w korpus



Rys. 2. Schemat badanego skraplacza freonu-21



Rys. 3. Schemat wkładu skraplacza freonu-21 (rozwinięcie i przekrój poprzeczny) wykonanego z rur mosiężnych żebrowanych, połączonych „kolankami” z rur stalowych gładkich



Rys. 3a. Profil żeber badanej rury

skraplacza tulejka termometru była wypełniona olejem z opiłkami żelaznymi. Temperaturę wody chłodzącej na wlocie i wylocie ze skraplacza mierzono termometrami laboratoryjnymi o najmniejszej podziałce $0,1^{\circ}\text{C}$. Ilość ciepła \dot{Q} przekazywanego wodzie chłodzącej określano z jej bilansu cieplnego. Obliczenia sprawdzające wykazały, że określona w ten sposób ilość ciepła pokrywa się z ilością wyznaczoną z bilansu parownika z dokładnością $\pm 6\%$. Pomiary wykonano w ciągu dwóch miesięcy, bezpośrednio po zainstalowaniu eksperymentalnego skraplacza na stanowisku, w związku z czym nie uwzględniono w obliczeniach wpływu zanieczyszczeń ścianek rur stanowiących powierzchnię wymiany ciepła.

3. Opracowanie wyników pomiarów

Wyniki pomiarów opracowano przy zastosowaniu metody użytej w pracy [9].

Współczynnik przejmowania ciepła przy skraplaniu pary freonu obliczano z zależności

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{\frac{1}{k} \frac{F_0}{\alpha_w F_w} \frac{d_z - d_w}{2} \frac{F_0}{\lambda_{SC} F_L}}, \quad (1)$$

tzn. odnoszono go do całkowitej powierzchni rury żebrowanej. Współczynnik przenikania ciepła k wyznaczano z zależności

$$k = \frac{\dot{Q}}{F_0 \Delta t_L}, \quad (2)$$

gdzie \dot{Q} jest ilością ciepła przejętego przez wodę chłodzącą.

Współczynnik przejmowania ciepła po stronie wody chłodzącej α_w określano z zależności [10]

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4*}) \quad Re \geq 10^4,$$

którą można przekształcić do postaci

$$\alpha_w = B \frac{(\gamma_w)^{0,8}}{d_w^{0,2}}, \quad (3)$$

gdzie B jest stałą ujmującą własności fizyczne wody, zależną od temperatury [10].

Ze względu na konfigurację odcinków rur w skraplaczu eksperymentalnym (rys. 3) uwzględniono w obliczeniach poprawkę, ujmującą wpływ ilości rur w pionowym rzędzie. Posłużono się w tym celu wzorem [11]

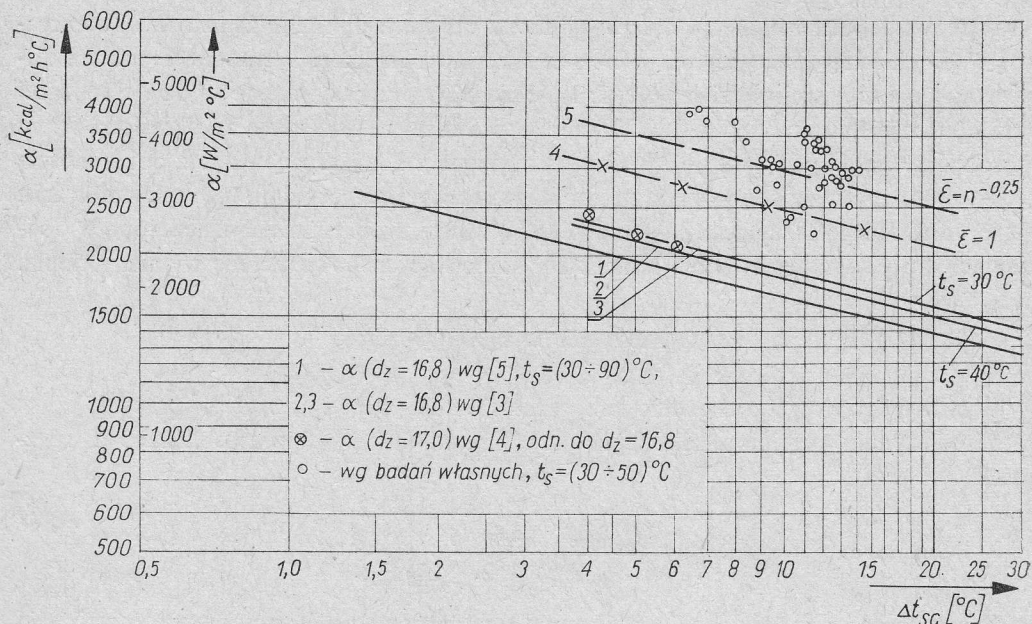
$$\bar{\varepsilon} = n^{-0,25}. \quad (4)$$

Obliczona według (4) poprawka dla konfiguracji rur według rys. 3 ma wartość $\bar{\varepsilon} \cong 1/1,2077$. W rezultacie wartości współczynnika przejmowania ciepła dla pojedynczej rury obliczano z zależności

$$\alpha = \bar{\alpha} / \bar{\varepsilon} = 1,2077 \bar{\alpha}, \quad (5)$$

gdzie $\bar{\alpha}$ określa wzór (1).

*) Zależność ta uwzględnia wpływ rozbiegu i obowiązuje dla $(L/D) \geq 50$. Przyjęto, że wpływ zakrzywień kanału (kolanek) nie przewyższa wpływu rozbiegu, wobec czego odrębnie wpływu zakrzywień kanału nie uwzględniono.



Rys. 4. Zestawienie wyników $\alpha=\alpha(\Delta t_{sc})$ według różnych autorów oraz własnych badań.

Średnią różnicę temperatur między skraplaną parą nasyconą (w pomiarach występowało przegrzanie pary, max do 3°C ; spowodowane dławieniem w rurociągu separator-skraplacz) i zewnętrzną powierzchnią rury żebrowanej obliczano ze związku

$$t_s - t_{sc} = \Delta t_L k / \alpha. \quad (6)$$

Z bezpośredniego pomiaru temperatury zewnętrznej powierzchni rury zrezygnowano z powodu trudności z określeniem średniej temperatury ścianki rury żebrowanej, silnie zmiennej po obwodzie (rys. 3 [12, 5]), a także wzdłuż rury.

Opracowane rezultaty pomiarów przedstawiono na rys. 4, na który naniesiono także krzywe dla rur gładkich według [4, 5], przeliczone na średnicę rury użytej w badaniach.

4. Omówienie wyników

Jak widać na rys. 4, wartości α obliczone na podstawie wyników pomiarów (prosta 5) są przy przyjęciu poprawki $\bar{\epsilon}=n^{-0,25}$ ok. 1,8 razy wyższe od wartości dla gładkiej rury (prosta 1) o odpowiedniej średnicy.

Wartości α wyznaczone na podstawie badań opisanych w niniejszej pracy należy uznać za nieco zawyżone, a to z powodu przyjęcia zawyżonego współczynnika poprawkowego $\bar{\epsilon}$, uwzględniającego wpływ skroplin ściekających na niżej położone rury [4, 11, 13]. Dotąd brak jednak dostatecznie sprawdzonych zależności, umożliwiających precyzyjne określenie tego współczynnika.

Biorąc pod uwagę przyjęty współczynnik $\bar{\epsilon}$, można ocenić rzeczywisty stopień intensyfikacji na ok. 1,6 - 1,7.

Uzyskane rezultaty są zgodne z wynikami [8] — uzyskano tam intensyfikację 1,5 - 2 razy, nie pokrywają się natomiast z wynikami [5] — stopień intensyfikacji wyniósł tam bowiem tylko ok. 1,2 - 1,3 razy.

Praca wpłynęła do Redakcji w lipcu 1971 r.

Literatura

- [1] R. Szewalski, *The Binary Vapour Turbine Set of Great Output, It's Concept and Some Basic Engineering Problems*. Prace IMP, z. 42 - 44, 1969, s. 119.
- [2] Research at Marchwood — 2000 MW Turbine Generators Using Steam/Freon Cycle. *Electrical Review*, 30 July 1965, s. 160/1.
- [3] H. G. Hirschberg, *Kältemittel*. C. F. Miller Verlag, Karlsruhe 1966.
- [4] B. Wood, *Alternative Fluids for Power Generation*. The Institution of Mechanical Engineering Steam Plant Group Proceedings 1969 - 70, Vol. 184, Part 1, Nr 40, s. 730/1.
- [5] J. J. Gogonin, A. R. Dorochow, *Tiepłoodacza pri kondienciacii frieona-21 na gorizontalnych trubkach*. Chołodilnaja Tiejchnika, 11/1970, s. 31/4.
- [6] J. W. Pietrowski, W. G. Fastowski, *Współczesne wysokosprawne wymienniki ciepła*. WNT, Warszawa 1964, s. 79/164.
- [7] W. M. Buznik, *Intensyfikacja ciepłobmienna w sudowych ustanowkach*, Izd. Sudostrojenije, Leningrad 1969, s. 293/7.
- [8] W. A. Karchu, W. P. Borowkow, *Plenocznaja kondienciacija para na gorizontalnych mielkoriebristych trubach*. Inż.-Fiz. Żurnał T. XIX, Nr 4, październik 1970, s. 617/24.
- [9] H. Henrici, *Kondensation von R-11, R-12 und R-22 an glatten und berippten Rohren*. Kältetechnik, Heft 8/1963, s. 251/6.
- [10] S. S. Berman, *Rasczet tiepłobmiennych apparatow turboustanowok*. Gosenergoizdat. Moskwa-Leningrad 1962, s. 237.
- [11] G. N. Daniłowa, O. P. Iwanow, S. W. Chiżniakow, *O mietodikie rasczeta koefficienta tiepłoodaczi pri kondienciacii frieonow na puczkie oriebriennych trub*. Chołodilnaja Tiejchnika, 6/1968, s. 10/3.
- [12] S. W. Chiżniakow, *Tiepłobmien pri kondienciacii frieona-12 i frieona-22 na gladkich i oriebriennych trubkach*. Chołodilnaja Tiejchnika, 1/1971, s. 31/4.
- [13] E. H. Young, D. J. Ward, *How to Design Finned Tube Shell and Tube Heat Exchangers*. The Refining Engineer, November 1957, s. C-32/6.

Экспериментальное исследование конденсации пара фреона Ф-21

Резюме

В работе представлены результаты экспериментальных исследований конденсации пара фреона Ф-21 на ребристых горизонтальных трубах, проведенных в лаборатории Института проточных машин ПАН. На очередных рисунках представлены:

рис. 1 — Схема экспериментальной установки,

рис. 2 — Эскиз конденсатора с обозначением измерительных точек,

рис. 3 — Схема системы трубок в конденсаторе и профиль ребер, катанных на трубах.

Метод обработки результатов замеров ясно вытекает из зависимостей (1)÷(6). Результаты замеров представлены на рис. 4.

Степень интенсификации теплообмена оценивается на $1,6 \div 1,7$, учитывая, что принятая в расчетах зависимость (4) приводит к повышенным значениям.

Experiments on Condensation of Freon-21 Vapour

Summary

The results of the experimental investigation into freon-21 vapour condensation on horizontal finned pipes are given. The experiments have been carried out in the laboratory of the Institute of Fluid-Flow Machines in Gdańsk. The figures illustrate:

fig. 1 — layout of the experimental setup,

fig. 2 — scheme of condenser with location of the measuring points,

fig. 3 — arrangement of pipes in the condenser and the profile of fins, rolled on the pipes.

The way, in which the measurement results have been processed, is made clear by the relations (1) through (6). For the results see fig. 4.

The degree of intensification of the heat transfer has been assessed to amount to 1.6 - 1.7, account being taken of the fact that the relation (4) adopted in the calculations entails some overestimate.