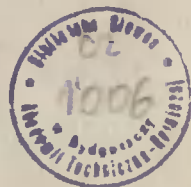


AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

ZESZYTY NAUKOWE NR 125

MECHANIKA 28



BYDGOSZCZ - 1985

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

ZESZYTY NAUKOWE NR 125

MECHANIKA 28



BYDGOSZCZ - 1985

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
doc. dr hab. Juliusz Skonieczny

REDAKTOR NAUKOWY
doc. dr hab. inż. Józef Szala

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE
mgr Anna Zawadzka, Zbigniew Gackowski

Wydano za zgodą Rektora
Akademii Techniczno-Rolniczej
w Bydgoszczy

ISSN 0208-6395

WYDAWNICTWO UCZELNIANE AKADEMII TECHNICZNO-ROLNICZEJ W BYDGOSZCZY

Wyd. I. Nakład 100+50 Ark. wyd. 4,61 Ark. druk. 5,0 Papier kl. V drukowy
Oddano do druku listopad 1985 r. Druk ukończono grudzień 1985 r.

MNSzWiT Cena zł 66,-
Uczelniany Zakład Małej Poligrafii ATR

Zamówienie nr 502/85

H-6/202

Wz. iluw. P 407 36

S p i s t r e ś c i

	str.
Przedmowa	5
1. Ireneusz Bielski: Niektóre aspekty projektowania procesu skrawania z umocnioną nagniataniem warstwą skrawaną na przykładzie toczenia wzdłużnego wałków	7
2. Mariusz Chalamoński: Badanie zawartości zanieczyszczeń w cieczach hydraulicznych metodą kolmatometryczną	17
3. Mariusz Chalamoński: Hydrodynamiczne metody badań zanieczyszczeń cieczy roboczych	25
4. Lech M. Kamiński, Marian Szymański, Jan Łukasiewicz: Układ automatycznej regulacji nawilżania i ogrzewania powietrza	31
5. Andrzej Laskowski: Ocena możliwości regulacji automatycznej komfortu cieplnego według temperatury wypadkowej jako wartości zadanej	41
6. Jan Łukasiewicz: Analiza przepływu zawiesiny włóknistej w przestrzeni roboczej generatora szybkozmiennych pulsacji ciśnienia ..	47
7. Marian Szymański, Jan Łukasiewicz: Rozwłóknianie azbestów z zastosowaniem kawitacji hydrodynamicznej	57
8. Andrzej Topoliński: Rozkład temperatury w laminarnym przepływie elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej	65
9. Krzysztof Wernerowski: Tłumienie dynamiczno-wiskotyczne drgań poprzecznych maszyn	75



PRZEDMOWA

Zeszyt Naukowy serii Mechanika 28 zawiera artykuły opracowane na podstawie wybranych referatów wygłoszonych podczas obrad Sympozjum nt. "Konstrukcja, technologia i eksploatacja maszyn", które odbyło się w dniu 28 października 1983 roku. Organizatorami tego Sympozjum byli: Instytut Technologii i Eksploatacji Maszyn oraz Koło Uczelniane SIMP przy Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy.

Celem Sympozjum było zaprezentowanie społeczności akademickiej oraz przedstawicielom przemysłu regionu bydgoskiego osiągnięć pracowników Instytutu Technologii i Eksploatacji Maszyn z zakresu konstrukcji, technologii i eksploatacji maszyn. Wygłoszono łącznie 30 referatów.

Potrzeba prezentowania aktualnego dorobku naukowo-technicznego pracowników Wydziału Mechanicznego Akademii Techniczno-Rolniczej spowodowała, że organizatorzy podjęli zamiar okresowego organizowania sympozjów na powyższy temat. Pierwsze sympozjum odbyło się 19-20 października 1977 roku, niniejsze było drugim z kolei. Trzecie sympozjum planowane jest na rok 1986.

KOMITET ORGANIZACYJNY

Ireneusz Bielski

NIEKTÓRE ASPEKTY PROJEKTOWANIA PROCESU SKRAWANIA
Z UMOCNIONĄ NAGNIATANIEM WARSTWĄ SKRAWANĄ
NA PRZYKŁADZIE TOCZENIA WZDŁUŻNEGO WALKÓW

W pracy przedstawiono zagadnienie obróbki skrawaniem materiałów 1H18N9T, 20, M58, PA4T z warstwą skrawaną umocnioną nagniataniem przez toczny element nagniatający działający na powierzchni skrawania. W wyniku badań dla danych warunków skrawania opracowano algorytm doboru parametrów nagniatania podczas toczenia wzdłużnego wałków z umocnioną nagniataniem warstwą skrawaną.

1. WSTĘP

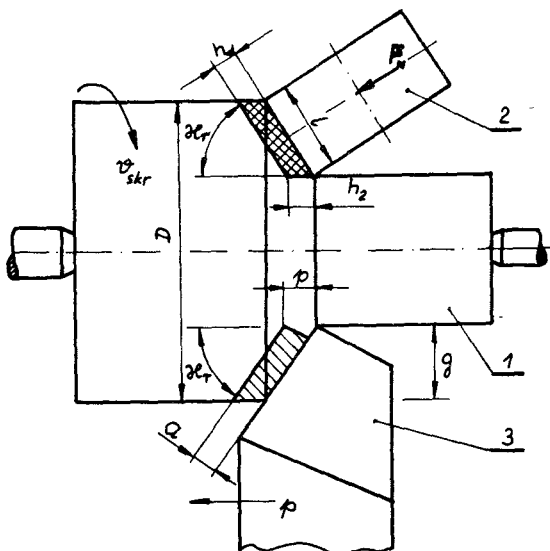
Dążenie do uzyskiwania coraz większej trwałości i niezawodności elementów maszyn i urządzeń przejawia się między innymi w tym, iż w procesach wytwarzania w zwiększonym zakresie stosuje się materiały o specjalnych właściwościach. Materiały te niejednokrotnie charakteryzują się złą skrawalnością.

Próby polepszenia skrawalności materiałów uznawanych za trudnoskrawalne doprowadziły do powstania wielu nowych technik skrawania [1, 2, 4, 7], [8]. Dla osiągnięcia podwyższonej dokładności obróbki oraz zwiększenia trwałości narzędzi skrawających do strefy skrawania doprowadza się dodatkową energię, wykorzystując do tego celu specjalne narzędzia i urządzenia.

Energię mechaniczną dostarcza się podczas wyprzedzającej skrawanie obróbki nagniataniem, najczęściej za pomocą elementów nagniatających tocznych [1, 6, 10, 11, 12] /rys.1/. Ma ona na celu plastyczne odkształcenie warstwy skrawanej dla wyczerpania zapasu plastyczności i w rezultacie zmniejszenie pracy odkształcenia podczas skrawania i obniżenie sił oraz temperatury skrawania [1]. Zagadnieniami skrawania materiałów z umocnioną nagniataniem warstwą skrawaną /UNWS/ zajmuje się wiele ośrodków w kraju i za granicą. Badania skrawania materiałów z UNWS są dość fragmentaryczne, dotyczą bowiem tylko wybranych materiałów trudnoskrawalnych zachowujących się w obróbce jak ciała plastyczne.

Brak pełnej zgodności co do usytuowania krawędzi skrawającej w stosunku do powierzchni skrawania, a także co do ilościowego wpływu takich czynników jak: siły nagniatania, średnica przedmiotu i elementu nagniatania-

jącego oraz długości styku tego elementu z materiałem obrabianym, skłoniły do podjęcia badań w tym temacie.



Rys.1. Schemat procesu skrawania materiału z warstwą skrawaną umocnioną nagniataniem elementem nagniatającym tocznym działającym na powierzchni skrawania

- 1 - przedmiot obrabiany
- 2 - element nagniatający
- 3 - nóż tokarski

2. ZAKRES BADAŃ

W badaniach wstępnych przeprowadzono próby wgłębiania penetratora walcowego w próbki z badanych materiałów. Badania realizowano dla następujących materiałów:

- stal stopowa kwasoodporna 1H18N9T /według PN-71/H-86020/,
- stal konstrukcyjna węglowa wyższej jakości, w gatunku 20 /według PN-75/H-84015/,
- stop aluminium do przeróbki plastycznej gatunku PA4T /według PN-79/H-88026/,
- mosiądz do przeróbki plastycznej gatunku M58 /według PN-77/H-87025/.

Badania wgłębiania penetratora o kształcie i wymiarach zgodnych z kształtem i wymiarami elementu nagniatającego prowadzono w celu określenia grubości warstwy umocnionej oraz wartości nacisków jednostkowych σ_N . Naciski te przyjęto określać jako

$$\sigma_N = \frac{F_N}{2b \cdot l} \quad \text{MPa}$$

gdzie:

F_N - siła nagniatania N

$2b$ - szerokość odcisku paska styku mm

l - długość odcisku paska styku mm

$/2b, l$ - mierzone w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku działania F_N

Próbki obciążano statycznie /na twardościomierzu Brinella/ oraz dynamicznie /na tokarce TUD-50/. Stosowano obciążenia $2452 \leq F_N \leq 29430$ N oraz elementy o średnicy $10 \leq 2R \leq 30$ mm i szerokości $3 \leq l \leq 12$ mm.

Wyniki badań wstępnych pozwoliły na wyznaczenie zakresu parametrów obróbki skrawaniem z UNWS. Badania główne obejmowały badania pracy skrawania z UNWS oraz badania optymalizujące parametry obróbki skrawaniem z UNWS podczas toczenia swobodnego. Mierzono następujące wskaźniki skrawalności:

- θ - temperatura skrawania,
- P_z - główna składowa oporu skrawania,
- A^z - praca skrawania.

Próby toczenia wzdłużnego dla określenia efektywności skrawania materiału z UNWS w stosunku do skrawania bez UNWS, a także dla określenia różnic pomiędzy skrawaniem swobodnym a nieswobodnym prowadzono przy parametrach, wyznaczonych na podstawie poprzedzających badań.

3. WYNIKI BADAŃ I ICH OPRACOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że warunki pracy narzędzia skrawającego ulegają zmianie w zależności od zmian wprowadzanych do warstwy skrawanej przez, poprzedzającą skrawanie, obróbkę nagniataniem.

Grubość warstwy zmienionej zależy od wartości naprężeń zewnętrznych, które jednoznacznie można określić dla danego materiału obrabianego za pomocą syntetycznego parametru σ_N /nacisków jednostkowych nagniatania/ [1]. Wartość parametru σ_N zależy od wartości czynników takich jak: siła nagniatania F_N /N/, średnica elementu nagniatającego $2R$ /mm/, długość styku l /mm/ oraz zastępczy promień krzywizny przedmiotu obrabianego φ /mm/. Wpływ tych czynników na wartości σ_N dla badanych materiałów przedstawiają poniższe zależności

$$1H18N9T \quad \sigma_N = 112,8 \cdot (2R)^{-0,295} \cdot l^{-0,250} \cdot F_N^{0,354} \quad (1)$$

$$20 \quad \sigma_N = 51,06 \cdot (2R)^{-0,319} \cdot l^{-0,234} \cdot F_N^{0,488} \quad (2)$$

$$M58 \quad \sigma_N = 200,4 \cdot (2R)^{-0,418} \cdot l^{-0,315} \cdot F_N^{0,308} \quad (3)$$

$$PA4T \quad \sigma_N = 157,8 \cdot (2R)^{-0,298} \cdot l^{-0,301} \cdot F_N^{0,291} \quad (4)$$

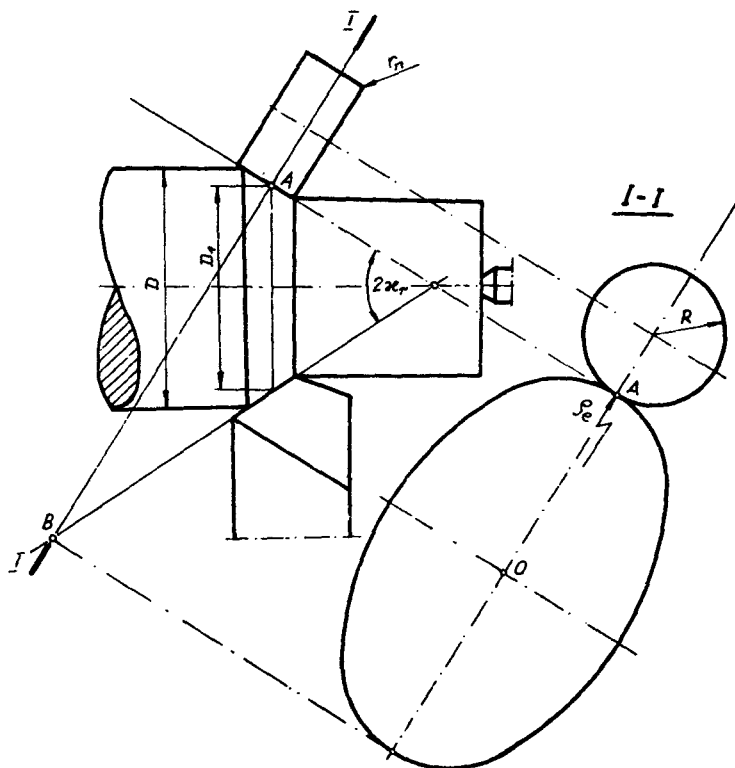
Wpływ zastępczego promienia krzywizny przedmiotu na σ_N w zakresie $\varphi = 0 + 45$ mm ujęto w postaci współczynnika poprawkowego k_φ , którego wartość

określono w badaniach [1]

$$k_{\varrho} = 1,316 - 0,007$$

(5)

Wartość zastępczego promienia krzywizny przedmiotu ϱ podczas toczenia wzdłużnego wałków wyznaczyć należy w zależności od kąta χ_r , posługując się ogólnym równaniem promienia okręgu ściśle stycznego do krzywej [13] /rys.2/.



Rys.2. Schemat toczenia z UNWS wraz z przekrojem prostopadłym do powierzchni skrawania w środku paska styku dla przypadku $\chi_r = \frac{\pi}{4}$ rad, ϱ_e - promień okręgu ściśle stycznego do elipsy w punkcie styku z walcowym elementem nagniatającym

Dla zakresu $0^\circ < \chi_r \leq 45^\circ$ jest to przypadek styczności II-rzędu z elipsą i zastępczy promień równa się

$$\varrho_e = \frac{D_1}{2 \cos \chi_r}$$

zaś dla przypadku styczności z parabolą, co ma miejsce w zakresie $\chi_r > 45^\circ$

$$\varrho_p = \frac{D_1}{4 \cos^3 \chi_r}$$

Do oceny efektywności obróbki skrawaniem z UNWS zarówno podczas toczenia swobodnego, jak i nieswobodnego, przyjęto 12 wskaźniki efektywności η_θ i η_P oznaczające

$$\eta_\theta = \frac{\theta - \theta_{SN}}{\theta} \quad \text{oraz} \quad \eta_P = \frac{P_z - P_{zN}}{P_z}$$

gdzie:

θ ; P_z - wartości uzyskane podczas skrawania bez UNWS

θ_{SN} ; P_{zN} - wartości uzyskane podczas skrawania z UNWS

oraz zaproponowano [1]

$$\eta_A = \frac{A - A_{SN}}{A}$$

gdzie:

A - całkowita praca skrawania warstwy materiału bez UNWS

A_{SN} - całkowita praca skrawania warstwy materiału z UNWS

Zebranie wartości nacisków jednostkowych, przy których, dla różnych grubości warstwy skrawanej - a , wskaźnik efektywności obróbki η_P osiągnął wartości maksymalne, pozwoliło na opracowanie zależności $\sigma_{N_{opt}} = f a$.

$$\text{Dla 1H18N9T} \quad \sigma_{N_{opt}} = 765,5 a + 261,5 \quad \text{MPa} \quad (6)$$

$$20 \quad \sigma_{N_{opt}} = 1770,5 a + 114,4 \quad \text{MPa} \quad (7)$$

$$\text{M58} \quad \sigma_{N_{opt}} = 517,6 a + 246,4 \quad \text{MPa} \quad (8)$$

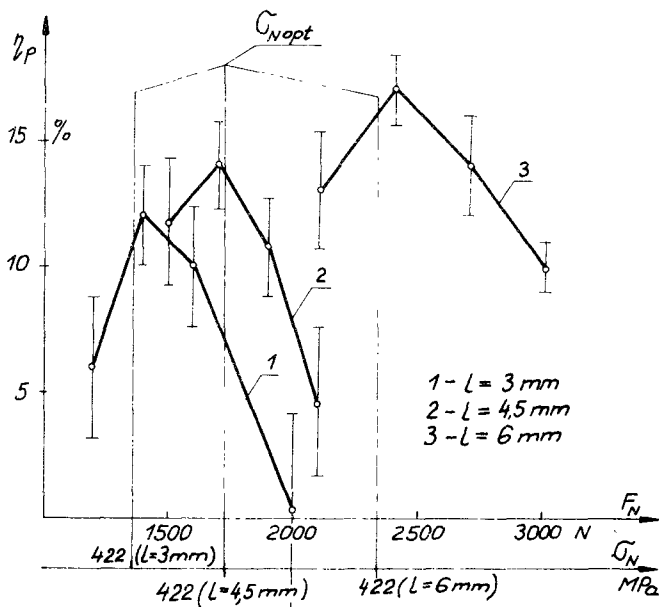
$$\text{PA4T} \quad \sigma_{N_{opt}} = 545,5 a + 295,7 \quad \text{MPa} \quad (9)$$

Próby toczenia wzdłużnego wałków realizowano stosując parametry ustalone w poprzedzających badaniach. Zmieniano jedynie siłę nagniatania, oscylując wokół wartości optymalnych, określonych na podstawie skrawania swobodnego.

Próby wykazały /rys.3/, że wskaźnik efektywności obróbki η_P uzyskuje wartości maksymalne dla nacisków jednostkowych o wartościach bliskich wartościom nacisków jednostkowych nagniatania $\sigma_{N_{opt}}$, obliczonych ze wzoru (6).

Wydaje się zatem, że projektując proces toczenia wzdłużnego wałków z UNWS, można korzystać z tych (6) zależności, pomimo iż ustalono je w warunkach skrawania swobodnego. Realizując wątek użyteczny badań, opracowano algorytm doboru warunków skrawania materiałów plastycznych z umocnioną nagniataniem warstwą skrawaną /rys.4/.

Mając dane wymiary przedmiotu obrabianego: średnicę D oraz głębokość skrawania g , należy opracować konstrukcję narzędzia nagniatającego, przy czym jedynym wymiarem mającym wpływ na grubość warstwy umocnionej [9] jest średnica elementu nagniatającego. Najczęściej przyjmuje ona wymiary 20 - 40 mm, co jest wynikiem ograniczeń konstrukcyjnych. Następnie z normatywów dla danego materiału należy dobrać geometrię ostrza oraz zalecane wartości posuwu i prędkości skrawania. Mając dobrany posuw oraz kąt przy-



Rys. 3. Wyniki badań weryfikujących uzyskane podczas toczenia nieswobodnego wzdłużnego $v = 0,306 \frac{m}{s}$, $a = 0,21$ mm, $2R = 25$ mm, $\varphi = 45$ mm, materiał 1H18N9T/ $p = 0,30 \frac{mm}{obr}$, G_{Nopt} - optymalna wartość nacisków jednostkowych nagniatania ustalona podczas prób skrawania swobodnego

stawienia można obliczyć grubość warstwy skrawanej [3, 5], a następnie korzystając z zależności (6-9) wartość optymalnych nacisków jednostkowych w funkcji grubości warstwy skrawanej.

Dla materiałów o nieznannej funkcji $G_{Nopt} = f(a)$ można przyjąć [1] następujący tok obliczeń:

- dla materiałów o znanej granicy plastyczności $R_{0,2}$ lub twardości HB należy obliczyć grubość warstwy umocnionej nagniataniem podczas próby statycznej, posługując się [1] zależnościami:

$$h = 0,43 G_N^{0,74} \cdot R_{0,2}^{-0,67} \quad (10)$$

lub

$$h = 0,63 G_N^{0,78} \cdot (HB)^{-0,91} \quad (11)$$

- naciski jednostkowe nagniatania G_N należy obliczyć po wykonaniu próby statycznej wgłębiania penetratora walcowego o średnicy $2R$ przy obciążeniu $P = F_N$ z zależności

$$G_N = \frac{F_N}{S}$$

gdzie:

$S = 2b \cdot l$ - pole powierzchni odcisku mierzone w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku działania siły F_N

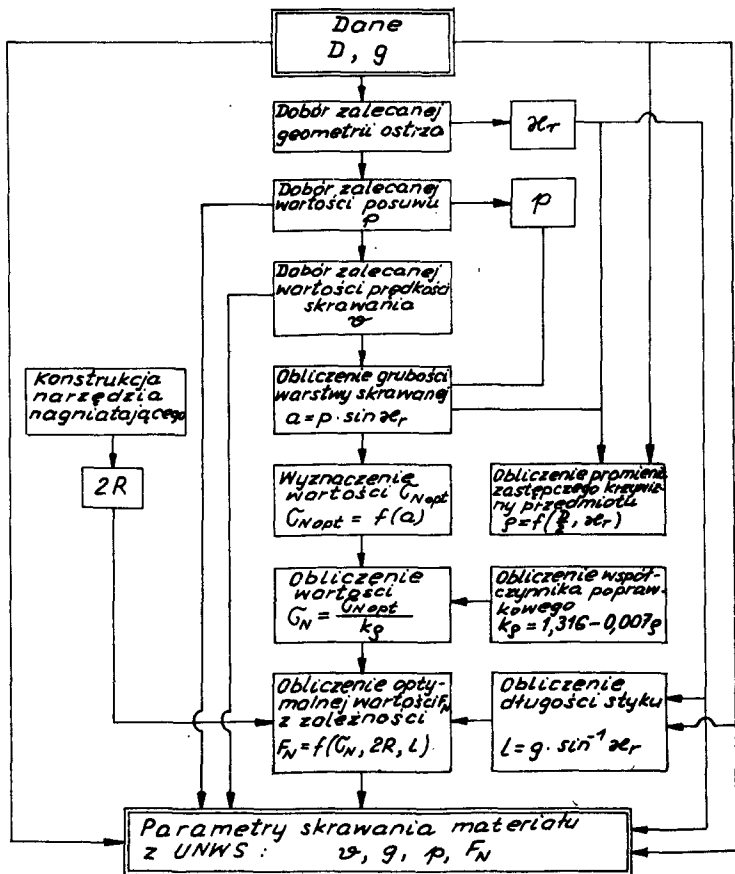
- ponieważ w badaniach 1 zaobserwowano, że najkorzystniejsze efekty otrzymuje się umieszczając krawędź skrawającą poniżej obszaru, w którym obserwuje się największy gradient mikrotwardości /te zaś występują dla różnych materiałów w odległości od powierzchni nagniatania 4 + 8 razy mniejszej od grubości warstwy umocnionej/, przyjęto

$$a_{opt} = 0,125 - 0,25 h_d \quad (12)$$

gdzie:

h_d - grubość warstwy umocnionej nagniataniem podczas obtaczania elementu nagniatającego po powierzchni skrawania, wynosząca 0,4 - 0,8 h

Po obliczeniu długości styku elementu nagniatającego z powierzchnią skrawania należy wyznaczyć optymalną wartość siły nagniatania, a następnie, po uwzględnieniu współczynnika k_φ , wartość zalecaną nacisków jednostkowych σ_N .



Rys.4. Algorytm doboru parametrów skrawania materiału z UNWS

4. WNIOSKI

W oparciu o przeprowadzone badania, uwzględniając literaturę z zakresu tematu, można wysunąć następujące wnioski:

- a. Efektywność procesu skrawania materiału z umocnioną nagniataniem warstwą skrawaną zależy od usytuowania krawędzi skrawającej w stosunku do powierzchni obrabianej.
- b. Najkorzystniejsze efekty uzyskuje się umieszczając krawędź skrawającą poniżej punktu Bielajewa.
- c. Przy projektowaniu procesu toczenia wzdłużnego materiałów z umocnioną nagniataniem warstwą skrawaną należy posłużyć się zaproponowanym algorytmem doboru parametrów obróbki nagniataniem i obróbki skrawaniem. Wydaje się celowym stosowanie proponowanego algorytmu dla doboru warunków skrawania z UNWS także dla innych metod obróbki materiałów zachowujących się w obróbce jak ciała plastyczne.

5. LITERATURA

- [1] Bielski I.: Badanie procesu skrawania materiału z umocnioną nagniataniem warstwą skrawaną. Praca doktorska, PP Poznań - Bydgoszcz, 1982
- [2] Bielski I.: Sposób obróbki skrawaniem z jednoczesną wstępną obróbką cieplną. Patent PRL 113175
- [3] Biernawski W.: Teoria obróbki metali skrawaniem. PWN, Warszawa 1956
- [4] Čistoserdcov P.S.: Kombinirovannyje instrumenty dla otdeločno-uproščniajuščej obrabotki. Belarus, Minsk 1977
- [5] Dmochowski J.: Podstawy obróbki skrawaniem. PWN, Warszawa 1978
- [6] Jaroslavcev V.M.: Opredelenie stojkosti instrumenta pri toženii s operežajuščim plastičeskim deformirovaniem. IVUZ Mašinstrojenie nr 5, 1979
- [7] Jaroslavcev V.M., Simonov A.G.: Primenenie vyglaživanija dla operežajuščego plastičeskogo deformirovanija materiala srezajemogo sloja pri naružnom toženii. IVUZ Mašinstrojenie nr 4, 1977
- [8] Jaroslavcev V.M., Talaev A.N.: Primenenie metoda operežajuščego plastičeskogo deformirovanija pri torcovom frezovenii. IVUZ Mašinstrojenie nr 5, 1977
- [9] Kudrjavcev V.I., Petuškov G.E.: Vlijanie krivizny poverchnostej na glubiny plastičeskoi deformacii pri uproščnenii detalej poverchnostnym naklepom. Vestnik Mašinstrojienia nr 7, 1966

- [10] Kulisz H.: Nowy sposób polepszenia skrawalności stali kwasoodpornej. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej: Wytwarzanie elementów maszyn ze stopów metali o specjalnych własnościach, Rzeszów 1975
- [11] Kulisz H., Vogel Z.: Wpływ wstępnego odkształcenia plastycznego warstwy skrawanej na siły skrawania przy toczeniu stali 1H18N9T. Materiały V Międzynarodowej Konferencji: Postępy w Teorii i Technice Obróbki Materiałów. Sekcja W, Kraków 1979
- [12] Podurajev V.N., Jaroslavcev V.M., Jaroslavceva N.A.: Sposob obrabotki rezaniem s operezajuščim plastičeskim deformirovaniem. Vestnik Mašinstrojenia nr 4, 1971
- [13] Wrona W.: Matematyka. PWN, Warszawa 1964

SOME ASPECTS OF DESIGNING THE CUTTING PROCESS WITH SURFACE HARDENED
BY BURNISHING EXEMPLIFIED BY CYLINDERS STRAIGHT TURNING

Summary

The paper presents some problems of cutting the materials 1H18N9T, 20, M58, PA4T with the surface hardened by burnishing with the roller acting on the cutting surface. As the result of the research for particular cutting conditions, there was elaborated a selection algorithm of burnishing parameters during straight turning of cylinders with the surface hardened by burnishing.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ С ОПЕРЕЖАЮЩИМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ НА ПРИМЕРЕ ПРОДОЛЬНОГО ТОЧЕНИЯ ВАЛОВ

Резюме

В работе представлена проблема обработки резанием материалов 1H18N9T, 20, M58, PA4T с опережающим пластическим деформированием элементом действующим на поверхности резания. В результате опытов для данных условий резания разработан алгоритм подбора параметров наклепа во время продольного точения валов с упрочненным наклепом подвергаемому резке слою.

Mariusz Chalamoński

BADANIE ZAWARTOŚCI ZANIECZYSZCZEŃ
W CIECZACH HYDRAULICZNYCH METODĄ KOLMATOMETRYCZNĄ

W artykule przedstawiono pomiar koncentracji i wielkości zanieczyszczeń cieczy hydraulicznych z użyciem kolmatomierza szczelinowego. Opisano własności i budowę przyrządu pomiarowego. Przedstawiono wyniki badań.

1. WSTĘP

Wysokie wymagania jakościowe stawiane układom paliwowym, hydraulicznym i smarowniczym stwarzają problem utrzymania ilości i wielkości zanieczyszczeń na ściśle określonym poziomie.

Kontrola zanieczyszczeń jest nową i dynamicznie rozwijającą się dyscypliną naukowo-techniczną o szerokim zakresie tematycznym, obejmującą metodykę oraz środki techniczne do ewaluacji zanieczyszczeń w cieczach hydraulicznych. Obszary zastosowania kontroli zanieczyszczeń obejmują wiele dziedzin związanych z produkcją i eksploatacją urządzeń hydraulicznych. Zaliczyć można do nich:

- pomiary rozkładu wymiarowego i koncentracji zanieczyszczeń stałych w cieczach hydraulicznych,
- badanie czystości powierzchni elementów precyzyjnych,
- wyznaczanie właściwości filtracyjnych urządzeń oczyszczających ciecze hydrauliczne,
- wyznaczanie wrażliwości na zanieczyszczenia elementów urządzeń,
- prognozowanie żywotności urządzeń i układów cieczowych w warunkach eksploatacji.

Aby sprostać wymaganiom stawianym problematyce kontroli zanieczyszczeń, należy dążyć do skonstruowania takich urządzeń kontrolno-pomiarowych, które wykazywałyby cechy adekwatne do warunków eksploatacji cieczy hydraulicznych.

Dotychczas opracowane urządzenia badawcze wykorzystują w konstrukcji czujników pomiarowych zjawiska fizyczne, zdecydowanie odmienne od tych, które występują podczas przepływu zanieczyszczonej cieczy w układach hydraulicznych. Urządzeniem pomiarowym, którego czujnik spełnia warunek kompatybilności z wrażliwością na zanieczyszczenia krytycznych węzłów urzą-

dzień hydraulicznych jest opracowany w Polsce kolmatomierz szczelinowy, służący do badań koncentracji i rozkładu wymiarowego zanieczyszczeń stałych w cieczach.

2. ZASADA DZIAŁANIA CZUJNIKA KOLMATOMETRYCZNEGO

Kolmatacja jest to zjawisko zmiany koncentracji zawiesiny cząstek stałych w cieczy podczas przepływu przez ośrodek porowaty, w którym cząstki są zatrzymywane. Wynikiem kolmatacji jest zmniejszenie się koncentracji cząstek stałych w przepływającej cieczy oraz wzrost koncentracji cząstek w ośrodku porowatym. Na proces kolmatacji składają się dwa zjawiska:

- kolmatacja wymiarowa /mechaniczna/ polegająca na zatrzymywaniu cząstek zawiesiny przez ośrodek porowaty wskutek różnic wymiarowych między cząstkami a porami,
- kolmatacja niewymiarowa /energetyczna/ spowodowana przez obliterację, adhezję, siły hydrodynamiczne i inne zjawiska natury fizykochemicznej.

W celu uzyskania powtarzalnych i ilościowo wiarygodnych zależności należy określić parametry zanieczyszczeń i ośrodka porowatego.

W czujniku kolmatometrycznym rolę ośrodka porowatego spełnia szczelina o znanych i ściśle określonych wymiarach. Przy posiadaniu pełnych informacji o własnościach czujnika i natężeniu przepływu cieczy czystej, na podstawie odchyłek charakterystyki przepływu, wnioskujemy o zawartości zanieczyszczeń. Przepływająca przez szczelinę zanieczyszczona ciecz powoduje osadzanie się w przekroju wlotowym cząstek stałych o wymiarach większych od wysokości szczeliny. Skutkiem tego zjawiska jest zmniejszenie się efektywnego przekroju przepływowego. Jako próg dyskryminacji wymiaru cząstek przyjęto wysokość szczeliny w czujniku kolmatometrycznym. Wielkość szczeliny pomiarowej określona jest, oprócz jej wymiarów geometrycznych, hipotetyczną liczbą porów określonej wielkości. Jest to wielkość ilościowo równa najmniejszej liczbie cząstek ustalonych wymiarów, koniecznej do całkowitego zatkania szczeliny.

Ogólnie równanie natężenia przepływu cieczy przez szczelinę wyraża się następującym wzorem

$$Q(t, n, N, \Delta p, A) = A \cdot [N - n(t)] \cdot \Delta p^a \quad (1)$$

gdzie:

- Q - objętościowe natężenie przepływu, zmieniające się wraz ze zmianą powierzchni przepływowej szczeliny spowodowanej osadzeniem się w niej cząstek
- A - współczynnik proporcjonalności charakteryzujący własności przepływającej cieczy
- $n(t)$ - liczba cząstek, które w czasie t osadziły się w szczelinie, zatkały n porów, zmniejszając tym samym efektywną powierzchnię przepływową

Δp - różnica ciśnień przed i za szczeliną

a - wykładnik potęgowy / $a=1$ dla przepływu laminarnego/

Wiedząc, że

$$z = \frac{n}{V} \quad (2)$$

gdzie:

z - wskaźnik kolmatacji /odpowiednik koncentracji zanieczyszczeń/ zdefiniowany jako stosunek ilości cząstek zatykających pory w szczelinie do objętości cieczy, której przepływ spowodował osadzenie tej ilości

oraz

$$Q(t) = \frac{dV}{dt} \quad (3)$$

można porównać wyrażenia (1) i (3)

$$\frac{dV}{dt} = A(N - zV) \cdot (\Delta p)^a \quad (4)$$

Przekształcając odpowiednio równanie (4), otrzymujemy /przy założeniu $p = \text{const}$ / następujące równanie różniczkowe

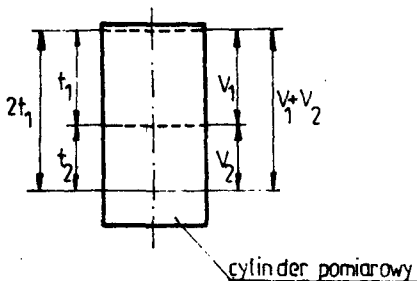
$$\frac{dV}{n - zV} = A \cdot \Delta p^a \cdot dt \quad (5)$$

Całkując obustronnie równanie (5) w granicach /0, V_1 /, /0, t_1 / otrzymujemy

$$\left[-\frac{1}{z} \ln(N - zV) \right]_0^{V_1} = [A \cdot \Delta p^a \cdot t]_0^{t_1} \quad (6)$$

Analogicznie, całkując równanie (5) w granicach / V_1 , $V_1 + V_2$ /, / t_1 , $2t_1$ /

$$\left[-\frac{1}{z} \ln(N - zV) \right]_0^{V_1 + V_2} = [A \cdot \Delta p^a \cdot t]_{t_1}^{2t_1} \quad (7)$$



Rys.1

Po podstawieniu granic całkowania w równaniu (6) otrzymujemy

$$-\frac{1}{z} [\ln(N - zV_1) - \ln N] = [A \cdot \Delta p^a \cdot t_1] \quad (8)$$

Analogicznie w równaniu (7)

$$-\frac{1}{z} \left\{ \ln[N - z(V_1 + V_2)] - \ln(N - zV_1) \right\} = A \cdot \Delta p^a \cdot t_1 \quad (9)$$

Porównując wyrażenia (8) i (9) oraz dokonując przekształceń otrzymujemy

$$N^2 - 2zNV_1 + z^2V_1^2 = N^2 - zNV_1 - zNV_2 \quad (10)$$

Po redukcji wyrazów podobnych i rozwiązaniu równania kwadratowego względem "z" mamy:

$$z_1 = 0 \quad / \text{rozwiązanie to odpowiada sytuacji, kiedy żadna cząstka nie osadziła się w szczelinie kolmatometrycznej} /$$

$$z_2 = \frac{N(V_1 - V_2)}{V_1^2} \quad (11)$$

Podstawiając za N wyrażenie $\frac{K}{y}$ otrzymujemy podstawową zależność do określania koncentracji zanieczyszczeń

$$z(x > y) = \frac{100 K}{y} \cdot \frac{V_1 - V_2}{V_1^2} \quad \frac{\text{sztuk}}{100 \text{ cm}^3} \quad (12)$$

gdzie:

$z(x > y)$ - liczba cząstek zanieczyszczeń o wymiarach x um większych od progu dyskryminacji y um

K - szerokość geometryczna szczeliny

V_1 - objętość cieczy przepływająca przez głowicę kolmatometryczną w czasie t

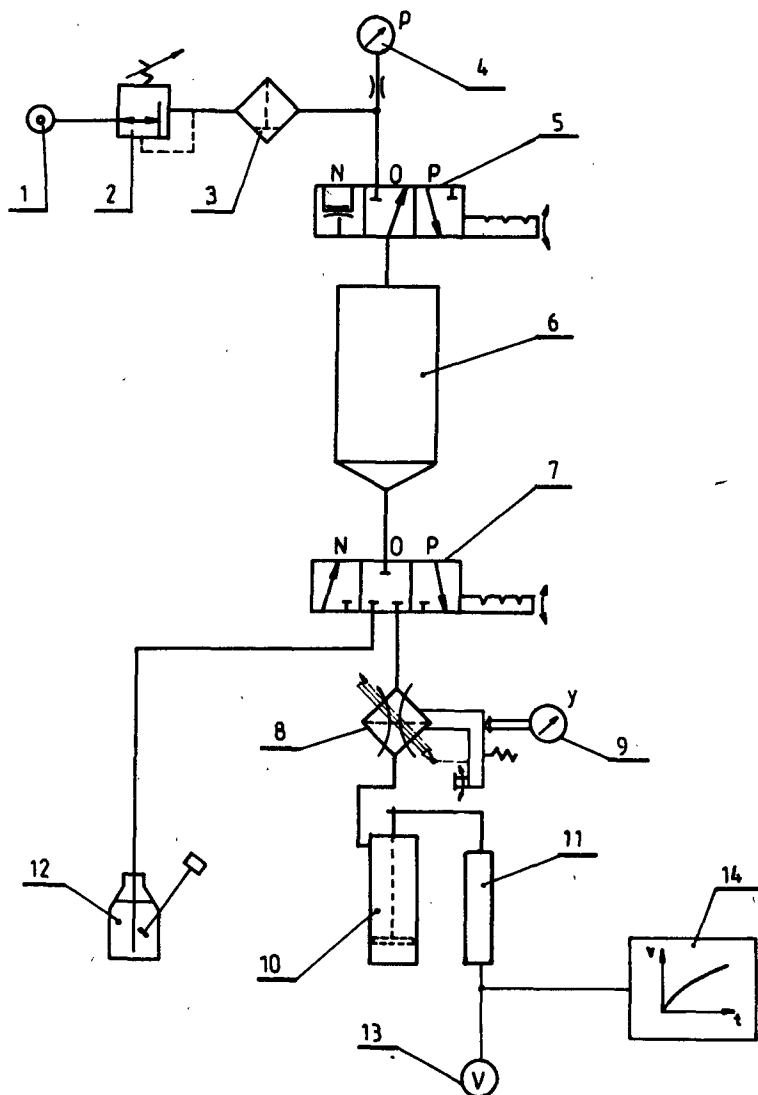
V_2 - objętość cieczy przepływająca przez głowicę kolmatometryczną w czasie od t do $2t$

Z zależności (12) wynikają ważne wnioski, na które należy zwrócić uwagę, gdyż stanowią one zalety przyjętej metody pomiarowej. Wynik pomiaru zawartości zanieczyszczeń jest niezależny od stanu przepływu /turbulentny, laminarny lub mieszany/ oraz cech fizykochemicznych cieczy /lepkość, gęstość/. Wymagany jest jedynie warunek stałości tych parametrów w jednym cyklu pomiarowym.

3. BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA KOLMATOMIERZA KL-4

Aparat kolmatometryczny KL-4 służy do wyznaczania zawartości zanieczyszczeń w optymalnym przedziale wymiarowym od 5 do 25 um z próbek cie-

czy o objętości 100 cm^3 i lepkości kinematycznej do 200 cSt w temperaturze 293 K . Schemat ideowy aparatu pokazano na rys.2.



Rys.2

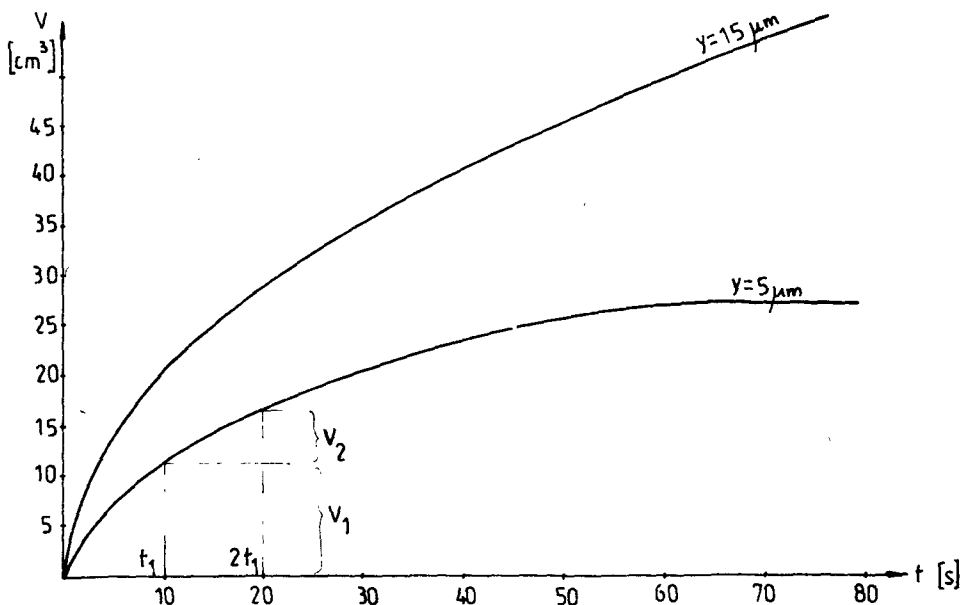
W aparacie wyróżniono następujące zespoły konstrukcyjne:

- zespół pneumatyczny złożony ze źródła zasilania /1/ /0,25 - 0,63 MPa/, zaworu stabilizacyjnego /2/, filtru pneumatycznego /3/ /0,8 μm /, manometru /4/ /klasy 06/ oraz rozdzielacza /5/,
- cylinder /6/ wykonany z przezroczystego tworzywa, o pojemności 100 cm^3 ,

- zawór hydrauliczny /7/,
- głowica kolmatometryczna /8/ wyposażona w czujnik mikrometryczny /9/ kontroli nastawy progu dyskryminacji.

Wyposażeniem uzupełniającym jest cylinderek z tłoczkiem /10/, z którym sprzężony jest przetwornik przesunięć /11/, pojemnik z badaną cieczą /12/, woltomierz cyfrowy /13/ oraz rysownica automatyczna /14/.

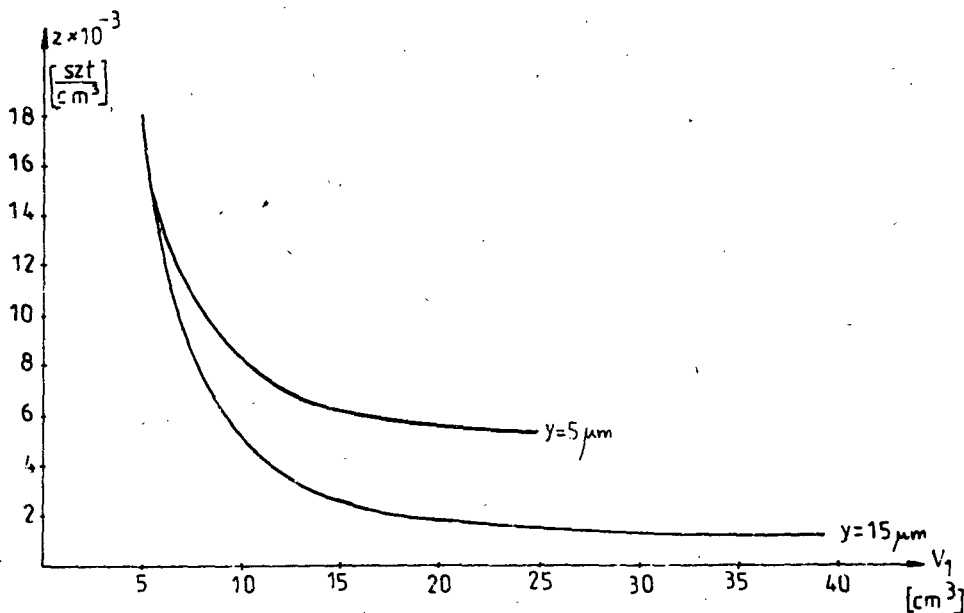
Działanie aparatu jest następujące: po przemyciu wszystkich części aparatu czystą cieczą myjącą /przefiltrowaną przez filtr $0,4 + 0,8 \mu\text{m}$ / i podłączeniu zasilania pneumatycznego /ciśnienie na manometrze /4/ równe $0,15 \text{ MPa}$ / należy napełnić cylinder /6/. W tym celu rozdzielacz /5/ ustawiamy w położeniu N - napełnianie, to samo położenie ustawiamy na zaworze hydraulicznym /7/. Po osiągnięciu poziomu odpowiadającego 100 cm^3 , zawór /7/ przestawiamy w położenie O oraz rozdzielacz /5/ w pozycję P - pomiar. Na głowicy kolmatometrycznej /8/ ustawiamy interesujący nas próg dyskryminacji y , kontrolowany czujnikiem /9/. Następnie przestawiamy zawór /7/ w pozycję P. W tym momencie rozpoczyna się pomiar. Ciecz przepływająca przez szczelinę czujnika dostaje się do cylindera pomiarowego /10/. Z tłokiem cylindera sprzężony jest ruchomy rdzeń przetwornika /11/, którego zadaniem jest zamiana wartości przesunięcia tłoczka na odpowiadający mu sygnał napięcia. Sygnał ten jest rejestrowany na rysownicy automatycznej /14/. Woltomierz /13/ umożliwia ustawienie tłoczka w cylindrze pomiarowym dokładnie w położeniu początkowym. Po usunięciu cieczy z cylindra pomiarowego i przemyciu układu można przystąpić do następnego pomiaru. Wyniki pomiarów pokazano na rys.3.



Rys.3

Zasada określania koncentracji zanieczyszczeń w badanej próbce cieczy jest następująca: na osi odciętych wyznaczamy czas t_1 /np. 10 s/, prowadzimy linię równoległą do osi rzędnych, aż do przecięcia z otrzymaną charakterystyką przepływu /np. dla szczeliny o wysokości $y=5 \mu\text{m}$ /. Na osi rzędnych odczytujemy objętość V_1 . Czynności powtarzamy dla czasu $2t_1$, w wyniku czego odczytujemy objętość V_2 . Otrzymane wartości V_1 oraz V_2 podstawiamy do wzoru (12). Analogicznie postępujemy dla innych przyjętych czasów t_1 , np. 15 s, 20 s, 25 s.

Z otrzymanych w taki sposób wartości koncentracji zanieczyszczeń, na rys.4 pokazano charakterystykę zmian wskazań kolmatomierza laboratoryjnego KL-4 w funkcji objętości V_1 .



Rys.4

Stabilizacja wskazań wielkości koncentracji zanieczyszczeń umożliwia określenie optymalnej objętości V_1 , dla której wskazania przyrządu pomiarowego nie ulegają zmianom. Upraszcza to znacznie cykl pomiarowy, gdyż wystarczy zmierzyć stoperem czas t_1 - odpowiadający przepływowi przyjętej objętości V_1 oraz objętość V_2 , którą jest ilość badanej cieczy przepływa - jącej przez szczelinę pomiarową w czasie od t_1 do $2t_1$.

4. WNIOSKI

Pomiar koncentracji zanieczyszczeń przy użyciu kolmatomierza szczeli- nowego jest metodą, która umożliwiła stosunkowo szybko /w porównaniu z in-

nymi stosowanymi metodami pomiarów/ znaleźć odpowiedź na pytanie, czy ilość zanieczyszczeń stałych zawartych w badanej próbce pozwala na prawidłową pracę układu, z którego ciecz została pobrana. Jak dowodzi praktyka, 75% uszkodzeń elementów układów hydraulicznych spowodowanych jest przekroczeniem dopuszczalnego poziomu zanieczyszczeń dla tych układów. Korzystając z istniejących siatek klas czystości, np. NAS 1638 lub GOST 17216-71, można ocenić klasę czystości badanej cieczy.

Wyniki pomiarów przy użyciu kolmatomierza szczelinowego weryfikowane były metodą mikroskopową. Błąd pomiaru koncentracji w obu metodach nie przekraczał 10%.

5. LITERATURA

- [1] Borowik S.: Filtry płynów roboczych. WNT, Warszawa 1974
- [2] Borowik S.: Kolmatometryczne badania zawartości zanieczyszczeń w cieczach hydraulicznych. Materiały pomocnicze do Laboratorium urządzeń hydraulicznych, Warszawa 1981
- [3] Chalamoński M.: Materiały ze stażu naukowego w Instytucie Automatyki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej /praca niepublikowana/, Warszawa 1981

INVESTIGATION INTO CONTAMINATION IN HYDRAULIC FLUIDS BY COLMATAGE METHOD

Summary

The article presents a description of a device for determining contamination in hydraulic fluids. The colmatage method was used. Properties and construction elements of the device are discussed. The results of the measurement are given as well.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЗАСОРЕНИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ КОЛЬМАТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Резюме

Представлены результаты измерения концентрации и величины засорения гидравлических жидкостей кольматометрическим методом. Описаны свойства и строение измерительного прибора. Представлены результаты исследований.

Mariusz Chalamoński

HYDRODYNAMICZNE METODY BADAŃ ZANIECZYSZCZEŃ CIECZY ROBOCZYCH

W artykule opisano hydrodynamiczne metody pomiaru składu granulometrycznego zanieczyszczeń cieczy roboczych. Dokonano podziału metod oraz omówiono ograniczenia stosowania poszczególnych metod pomiarowych.

1. WSTĘP

Jednym z najważniejszych i nowych zagadnień związanych z eksploatacją urządzeń płynowych jest zapewnienie odpowiedniej czystości tych urządzeń. Chodzi tu o tzw. czystość "wewnętrzna", mającą decydujący wpływ na jakość realizacji zadań nakładanych urządzeniom płynowym. Wynika to ze stwierdzonego faktu, że czystość "wewnętrzna" jest miernikiem stałości założonych parametrów technicznych. Tak więc, nie tylko stopień zużycia elementów, a zatem i czas pracy układu, lecz także własności statyczne i dynamiczne ulegają pogorszeniu zawsze tam, gdzie nie zapewniono właściwej czystości "wewnętrznej".

Stopień zanieczyszczenia cieczy roboczych ma bezpośredni wpływ na poprawność działania elementów z nimi współpracujących oraz stanowi podstawowe kryterium oceny danej cieczy. Z wymagań jakościowych stawianych urządzeniom hydraulicznym wynika bardzo ważna rola, jaką spełnia kontrola zanieczyszczeń cieczy roboczych.

W praktyce istnieje wiele metod badania czystości cieczy roboczych. Wymagają one użycia specjalistycznych mikroskopów, liczników półautomatycznych, zautomatyzowanych analizatorów i innych urządzeń.

W niniejszym artykule przedstawiono hydrodynamiczne metody pomiaru składu granulometrycznego zanieczyszczeń stałych cieczy roboczych.

2. HYDRODYNAMICZNE METODY BADANIA SKŁADU GRANULOMETRYCZNEGO ZANIECZYSZCZEŃ CIECZY ROBOCZYCH

Metody hydrodynamiczne, ze względu na sposób oddziaływania sił masowych na cząstki zanieczyszczeń, można podzielić następująco:

- pomiar w polu sił ciężkości,
- pomiar w polu sił wymuszonych.

Do drugiej grupy zaliczono pomiar koncentracji i składu granulometrycznego zanieczyszczeń stałych przy pomocy kolmatomierza szczelinowego, z uwagi na wymuszony różnicą ciśnień na szczelinie pomiarowej przepływ badanej cieczy.

2.1. Sedymentacja cieczy w polu sił ciężkości [1]

Podstawowym warunkiem skutecznego zastosowania sedymentacji do oznaczania składu cząstek dyspersyjnego układu jest, aby układ na początku sedymentacji był w stanie równomiernego rozdziału poszczególnych cząstek w przestrzeni sedymentacyjnej oraz aby podczas sedymentacji nie zachodziło, w wyniku koagulacji, wzajemne oddziaływanie cząstek na siebie. Przy spełnieniu powyższych warunków każda cząstka sedymentuje z szybkością zależną od jej wielkości.

Przy założeniu kulistości cząstek, siła ciężkości G działająca na cząstkę zanurzoną w cieczy wynosi

$$G = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_{cz}^3 \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot g \quad N \quad (1)$$

gdzie:

d_{cz} - średnica cząstki m
 ρ_1 - gęstość właściwa cząstki kg/m³
 ρ_2 - gęstość właściwa cieczy kg/m³
 g - przyspieszenie ziemskie m/s²

natomiast siła oporu przy ruchu jednostajnym cząstki wynosi

$$W = 3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot v \cdot d_{cz} \quad N \quad (2)$$

gdzie:

η - współczynnik lepkości dynamicznej Pa · s
 v - prędkość ruchu cząstki m/s

W ruchu ustalonym prędkość cząstki wyraża się wzorem

$$v = \frac{H}{t} \quad (3)$$

gdzie:

H - droga cząstki /wysokość pomiarowa/ m
 t - czas opadania cząstki s

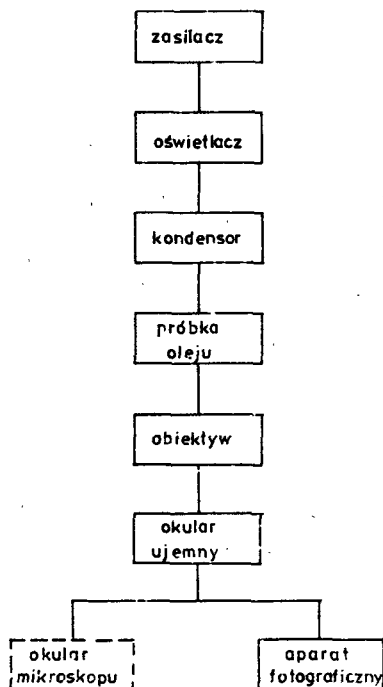
Tak więc średnica cząstki wynosi

$$d_{cz} = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta}{g \cdot (\rho_1 - \rho_2)}} \cdot \frac{H}{t} \quad m \quad (4)$$

Zaletą metody sedymentacyjnej jest prosta aparatura, możliwość pomiaru średnic cząstek w szerokim zakresie, duża dokładność pomiaru.

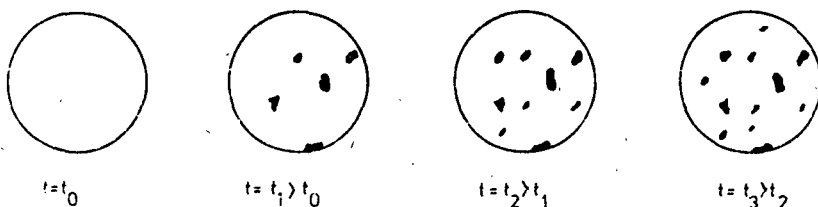
2.2. Metoda mikroskopu sedymentacyjnego [2, 3]

Metoda ta umożliwia pomiar ciężaru, kształtu, ilości i koncentracji cząstek zanieczyszczeń. Schemat mikroskopu sedymentacyjnego pokazano na rys.1.



Rys.1. Schemat blokowy mikroskopu sedymentacyjnego

Próbkę oleju, znajdującą się na stoliku przedmiotowym, można obserwować w okularze mikroskopu lub w przystawce pryzmatycznej aparatu fotograficznego. Należy wykonać cykl zdjęć w określonych odstępach czasu. Wykorzystując zasadę sedymentacji cząstek, rejestruje się czas opadania zanieczyszczeń o coraz mniejszym ciężarze i wymiarach. Na rys.2 pokazano kolejne fazy osadzania się cząstek zanieczyszczeń na dnie naczynia sedymentacyjnego.

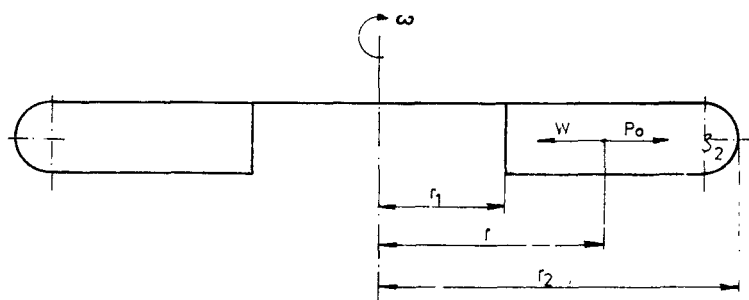


Rys.2. Kolejne fazy rejestracji osadzających się zanieczyszczeń

Opisana metoda jest jedną z doskonałszych metod umożliwiającą rejestrację cząstek w szerokim zakresie wymiarowym od 0,5 do 200 μm .

2.3. Pomiar w polu sił masowych wymuszonych [1]

Jedną z metod pomiaru składu granulometrycznego cząstek w polu sił masowych wymuszonych jest pomiar z wykorzystaniem siły odśrodkowej. Urządzeniem, za pomocą którego można ilościowo wyznaczyć sedimentację w polu sił odśrodkowych jest wirówka. Rysunek 3 pokazuje układ sił oddziałujących na cząstkę stałą w wirówce.



Rys.3. Układ sił oddziałujących na cząstkę stałą w wirówce

Dla ruchu cząstki opisywanego prawem Stokesa, siła oporu W ośrodka wynosi

$$W = 3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_{cz} \cdot \frac{dr}{dt} \quad \text{N} \quad (5)$$

gdzie:

d_{cz} - średnica cząstki m
 t - czas s

Siła odśrodkowa P_o równa się

$$P_o = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_{cz}^3 \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot \omega^2 \cdot r \quad \text{N} \quad (6)$$

gdzie:

ρ_1 - gęstość właściwa cząstki kg/m^3
 ρ_2 - gęstość właściwa cieczy kg/m^3
 ω - prędkość kątowa ruchu obrotowego rad/s

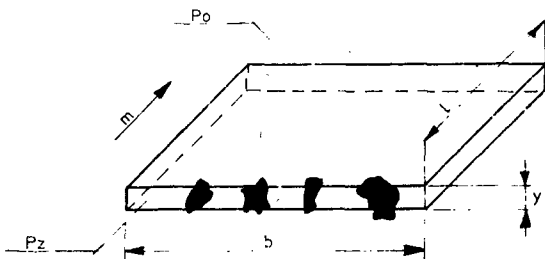
Po przyrównaniu tych sił i scałkowaniu otrzymujemy zależność na czas t , potrzebny na pokonanie odległości od powierzchni cieczy w probówce wirówki do jej dna

$$t = \frac{18 \cdot \eta}{(\rho_1 - \rho_2) \cdot \omega^2 \cdot d_{cz}^2} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (7)$$

Przy zastosowaniu wirówki można wyznaczyć wymiary cząstek w zakresie od 3 do 500 μm .

2.4. Kolmatomierz szczelinowy [3]

Kolmatomierz szczelinowy jest urządzeniem pomiarowym wykorzystującym zjawisko kolmatacji wymiarowej, tj. zatrzymywania cząstek stałych, znajdujących się w badanej cieczy przepływającej przez szczelinę pomiarową. Szczelina jest tak wykonana, aby jej wysokość mierzona w przekroju przepływowym była mniejsza od największych cząstek mierzonych zanieczyszczeń.



Rys.4. Przepływ cieczy przez szczelinę pomiarową kolmatomierza
 b - szerokość przepływu szczeliny
 l - długość przepływu szczeliny
 y - wysokość szczeliny

p_z, p_o - ciśnienia cieczy na dolocie i odlocie szczeliny
 m - kierunek przepływu cieczy

Przy zastosowaniu metod opartych na zjawisku kolmatacji nie uzyskuje się informacji o pojedynczej cząstce, lecz o grupie cząstek jako całości. Podany zakres wymiarowy od 10 do 60 μm dotyczy urządzenia, którego modele zostały opracowane w Polsce. Pomiar cząstek o wymiarach powyżej 100 μm może być obarczony dużym błędem wskutek sedimentacji.

Zaletą metody kolmatometrycznej jest przybliżenie warunków pomiaru do warunków rzeczywistego oddziaływania zanieczyszczeń zawartych w cieczy na układ i w ten sposób symulowanie warunków przepływu cieczy przez najbardziej krytyczne węzły urządzeń hydraulicznych.

3. OGRANICZENIA METODY HYDRODYNAMICZNEJ BADANIA ZANIECZYSZCZEŃ CIECZY ROBOCZYCH

Podstawowym błędem charakterystycznym dla metod sedimentacji w cieczach jest hydrodynamiczny opływ obszaru pomiarowego przez cząstki. Zjawisko opływu powoduje, że stężenie zawiesiny pobranej do badania jest inne niż stężenie w objętości pomiarowej aparatu pomiarowego. Błędy te mogą być skorygowane, ponieważ są funkcją parametrów przyrządów pomiarowych i parametrów mierzonych cząstek.

Wadami metod sedimentacji w cieczach są:

- pracochłonność pomiarów,
- czułość stanowiska pomiarowego na zakłócenia mechaniczne i termicz-

ne,

- niedokładność pomiarów przy małej różnicy gęstości cząstek fazy stałej i cieczy sedymentacyjnej,
- mała dokładność pomiarów; dobrą dokładność można uzyskać tylko przy małych prędkościach opadania /cząstki mniejsze od 100 μm /.

Metody kolmatacyjne posiadają następujące wady:

- trudności technologiczne przy wykonywaniu szczelin,
- zmiany wymiarów szczelin /np. przez czyszczenie/,
- długi czas pomiaru,
- małe przepływy i trudności ich zmierzenia,
- ograniczony zakres pomiarowy wskutek obliteracji szczelin i sedymentacji cząstek.

4. LITERATURA

- [1] Baczewski K., Hebda M., Jaroszczyk T.: Filtracja oleju, paliwa i powietrza w tłokowych silnikach spalinowych. WKŁ, Warszawa 1977
- [2] Bolšakov G.F., Sibarova J.J., Timofiejew V.F.: Metod opredelenija dispersnosti častic zagrjaznienij v toplivach i masłach. Chimija i Technologija Topliv i Maseł nr 6, 1973
- [3] Borowik S.: Filtry płynów roboczych. WNT, Warszawa 1974

HYDRODYNAMIC METHODS FOR IMPURITIES MEASUREMENT OF WORKING FLUIDS

Summary

The paper presents hydrodynamic methods for measurement of contaminants in working fluids. An exemplary division of the methods was made and their application discussed.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИИ ЗАСОРЕНИИ РАБОЧИХ ЖИДКОСТЕЙ

Резюме

В статье представлены гидродинамические методы измерения гранулометрического состава загрязнения рабочих жидкостей. Осуществлено разделение методов, а также рассмотрены проблемы ограничения применения отдельных измерительных методов.

Lech M. Kamiński
Marian Szymański
Jan Łukasiewicz

UKŁAD AUTOMATYCZNEJ REGULACJI NAWILŻANIA I OGRZEWANIA POWIETRZA

Opracowano układ nawilżania i ogrzewania powietrza z zastosowaniem automatycznej regulacji wymienionych wyżej parametrów. Układ składa się z następujących obwodów: rejestracji i regulacji temperatury, regulacji wilgotności względnej, regulacji poziomu wody w instalacji zasilającej dysze rozpylające wodę. W układzie do pomiaru i regulacji wilgotności względnej zastosowano czujnik chlorolitowy.

1. WSTĘP

W licznych procesach technologicznych wymagane jest uzyskiwanie lub utrzymywanie określonych wartości parametrów wilgotnego powietrza. Stan tego czynnika ulega zmianom w wyniku wymiany masy i ciepła. Oba zjawiska zachodzą zazwyczaj jednocześnie i mają złożony przebieg.

Nawilżanie i ogrzewanie powietrza są podstawowymi operacjami przeprowadzanymi dla uzyskania założonych zmian jego stanu. Ze względu na oszczędność energii i zapewnienie prawidłowego ich przebiegu, uzasadnionym jest zastosowanie automatycznej regulacji przepływu ciepła i ilości doprowadzanej wody. Dobór sposobów doprowadzania ciepła i wody oraz metod regulacji przebiegu tych operacji powinien być przeprowadzany na podstawie analizy warunków, w jakich odbywa się obróbka powietrza oraz wpływu jej na proces technologiczny, w którym bierze udział wilgotne powietrze.

2. NAWILŻANIE I OGRZEWANIE POWIETRZA

Do nawilżania powietrza stosuje się następujące metody: nawilżanie poprzez kontakt powietrza z powierzchnią parującej wody o temperaturze wyższej niż graniczna temperatura chłodzenia, poprzez rozpylanie wody w powietrzu i odparowanie drobnych jej kropeł oraz poprzez doprowadzanie do po-

wietrza strumienia nasyconej pary wodnej. Wzrost wilgotności powietrza osiągnąć można również przez wprowadzenie do nawilżanego powietrza strumienia powietrza o wyższej wartości wilgotności i zmieszanie obu strumieni.

Przy nawilżaniu powietrza poprzez bezpośredni kontakt tego powietrza z powierzchnią parującej wody, strumień masy wody, która odparowuje z elementu powierzchni dF określa znane równanie

$$dm = \beta \cdot (p_{on} - p_o) \cdot dF \frac{kg}{s} \quad (1)$$

gdzie:

- m - strumień masy odparowanej wody w $\frac{kg}{s}$
- β - współczynnik w $\frac{kg}{m^2 \cdot s \cdot Pa}$
- p_{on} - ciśnienie cząstkowe pary wodnej w warstwie granicznej powietrza w Pa
- p_o - ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu w Pa
- F - powierzchnia parowania w m^2

Równanie powyższe ustala zależność między masą odparowanej wody a parametrami określającymi stan powietrza. Czynnikiem decydującym o przebiegu parowania jest różnica ciśnień cząstkowych pary wodnej w warstwie granicznej powietrza, przylegającej do powierzchni wody i w powietrzu. W przypadku, gdy ciśnienie cząstkowe pary wodnej w warstwie granicznej jest niższe niż ciśnienie cząstkowe pary w otaczającym powietrzu, następuje wykraplanie się pary wodnej z powietrza.

Przy stałym ciśnieniu barometrycznym ciśnienie cząstkowe pary wodnej jest jednoznacznie określone przez wilgotność właściwą powietrza. Ze względu na liniową /w przybliżeniu/ zależność między ciśnieniem cząstkowym pary a wilgotnością właściwą, różnicę ciśnień cząstkowych można zastąpić różnicą wilgotności właściwych powietrza. Równanie 1 przyjmuje wtedy postać

$$dm = 6 \cdot (x_g - x) \cdot dF \frac{kg}{s} \quad (2)$$

gdzie:

- 6 - współczynnik przejmowania wilgoci w $\frac{kg}{m^2 \cdot s}$
- x_g - wilgotność właściwa powietrza w warstwie granicznej w $\frac{kg}{kg}$
- x - wilgotność właściwa powietrza w $\frac{kg}{kg}$

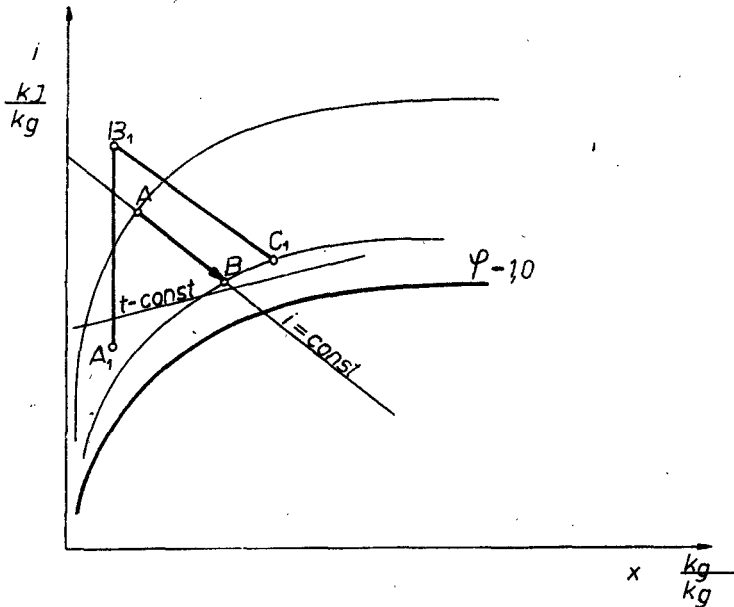
Wartość strumienia ciepła przejmowanego przez powietrze wraz z odparowującą do niego wodą wyrażona jest zależnością

$$dQ = 6 \cdot (i_g - i) \cdot dF \frac{kJ}{s} \quad (3)$$

gdzie:

- i_g - entalpia powietrza wilgotnego w warstwie granicznej w $\frac{kJ}{kg}$
- i - entalpia powietrza wilgotnego w $\frac{kJ}{kg}$

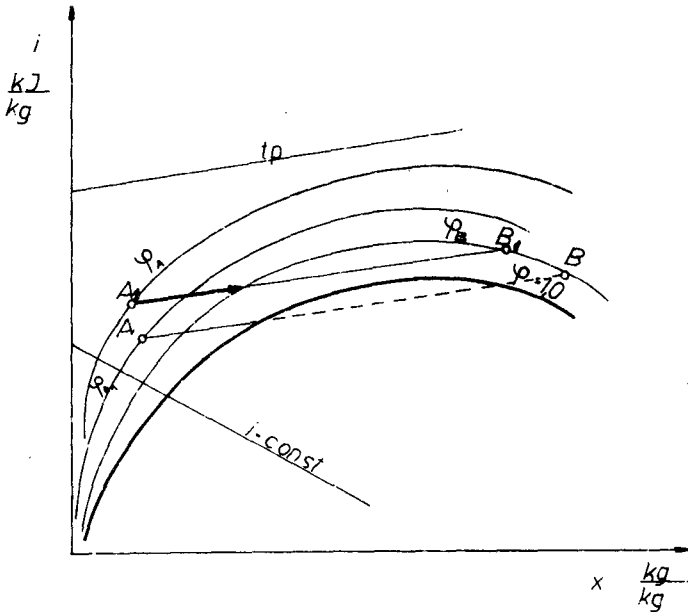
Nawilżanie powietrza rozpylaną wodą jest przemianą przebiegającą przy stałej wartości entalpii. Przebieg tej przemiany przedstawiono na wykresie $i-x$, zamieszczonym na rysunku 1, linią AB .



Rys.1. Przebieg na wykresie $i-x$ nawilżania powietrza rozpylaną wodą

W przypadku, gdy nawilżanie połączone jest z jednoczesnym ogrzewaniem powietrza dla uniknięcia zjawiska skraplania się rozpylonej wody, powietrze należy przed nawilżaniem podgrzać, prowadząc operację według linii $A_1 B_1 C_1$.

Przy nawilżaniu powietrza parą wodną nasyconą o temperaturze t_p , kierunek przemiany na wykresie $i-x$ jest zgodny z kierunkiem izotermy t_p . Przebieg nawilżania powietrza strumieniem wprowadzonej do niego pary wodnej przedstawiono na wykresie $i-x$, zamieszczonym na rysunku 2, linią AB . W przypadku nawilżania powietrza o temperaturze stosunkowo niskiej następuje wykraplanie się wody. Linia AB przemiany na wykresie $i-x$ przebiega przez obszar mgły. Zjawisko wykraplania się wody jest w wielu procesach technologicznych niepożądanym i szkodliwym. Dla jego uniknięcia należy parę wodną wprowadzić do powietrza podgrzanego tak, aby przemiana nie przebiegała przez obszar mgły. Przemianę taką przedstawiono na wykresie linią $A_1 B_1$. Wraz z parą wodną doprowadzane jest do powietrza również ciepło. Ogrzewanie i jednoczesne nawilżanie powietrza parą wodną może w pewnych przypadkach, przy nadmiarze pary wodnej, doprowadzić do wykraplania się wody. Zjawisko to występuje zwłaszcza w początkowej fazie operacji, gdy strumień pary wodnej wprowadzany jest do powietrza o niskiej temperaturze.



Rys.2. Przebieg nawilżania powietrza strumieniem pary wodnej

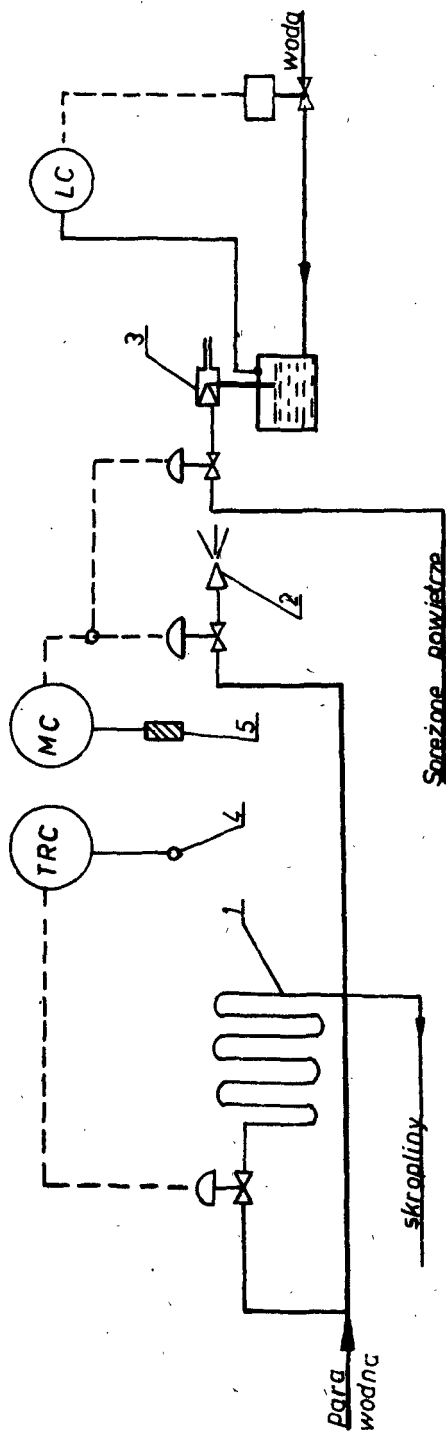
Z przeprowadzonej wyżej analizy nawilżania i ogrzewania powietrza wynika, że dla zabezpieczenia przed wykraplananiem się wody należy w sposób ciągły utrzymywać dla każdej wartości temperatury i wilgotności właściwą wartość wilgotności względnej, mniejszą od jedności. Warunek ten spełnić można stosując automatyczną regulację przebiegu operacji. Parametrami, których wartość należy regulować są temperatura i wilgotność względna powietrza.

3. UKŁAD POMIARÓW ORAZ AUTOMATYCZNEJ REGULACJI TEMPERATURY I WILGOTNOŚCI WZGLĘDNEJ POWIETRZA

Na rysunku 3 przedstawiono uproszczony schemat układu pomiarów i automatycznej regulacji temperatury i wilgotności względnej powietrza. Składa się on z następujących obwodów:

- rejestracji i regulacji temperatury,
- regulacji wilgotności względnej powietrza,
- rejestracji wilgotności względnej powietrza,
- regulacji poziomu wody w instalacji zasilającej dysze rozpylające wodę.

Obwód rejestracji i regulacji temperatury steruje pracą grzejników przeponowych zasilanych parą wodną. Zbudowany jest on z pneumatycznego przetwornika temperatury z czujnikiem manometrycznym, pneumatycznego regulatora mieszkowego typu PID, rejestratora pneumatycznego, stacyjki operacyjnej oraz urządzenia wykonawczego. Urządzenie wykonawcze stanowi zawór



Rys.3. Schemat układu pomiarów i automatycznej regulacji temperatury i wilgotności względnej powietrza
 TRC - regulator i rejestrator temperatury
 MC - elektroniczny regulator wilgotności względnej powietrza
 LC - regulator poziomu

- 1 - grzejnik, 2 - dysza parowa, 3 - dysza wodna, 4 - czujnik temperatury,
- 5 - czujnik wilgotności względnej

regulacyjny z membranowym siłownikiem pneumatycznym i ustawnikiem pozycyjnym zainstalowanym na przewodzie doprowadzającym parę wodną do grzejników przeponowych. Przed i za zaworem regulacyjnym zainstalowane są zawory odcinające, a równolegle z nim zawór na przewodzie bocznikującym. Układ taki umożliwi zasilanie grzejników parą wodną w przypadku wyłączenia z pracy zaworu regulacyjnego. Przetworniki pomiarowe i urządzenia wykonawcze zainstalowane powinny być przy obiekcie podlegającym regulacji. Rejestratory z zabudowanymi w nich regulatorami oraz stacyjkami operacyjnymi umieszczone mogą być w szafie sterowniczej zlokalizowanej w pobliżu obiektu lub oddalonej od niego na odległość nie większą niż 100 m. Rejestratory umożliwiają zapis na taśmie papierowej przebiegu zmian temperatury oraz wskazywania nastawionej wartości zadanej tego parametru. Stacyjka operacyjna służy do nastawiania wartości zadanej tego parametru /temperatury/ i przełączania układu z regulacji automatycznej na regulację ręczną lub odwrotnie. Zabudowane są w niej dwa nastawniki ciśnienia, z których jeden przeznaczony jest do nastawiania wartości ciśnienia, stanowiącej zadana wartość temperatury, a drugi do ręcznego sterowania zaworem regulacyjnym układu wykonawczego.

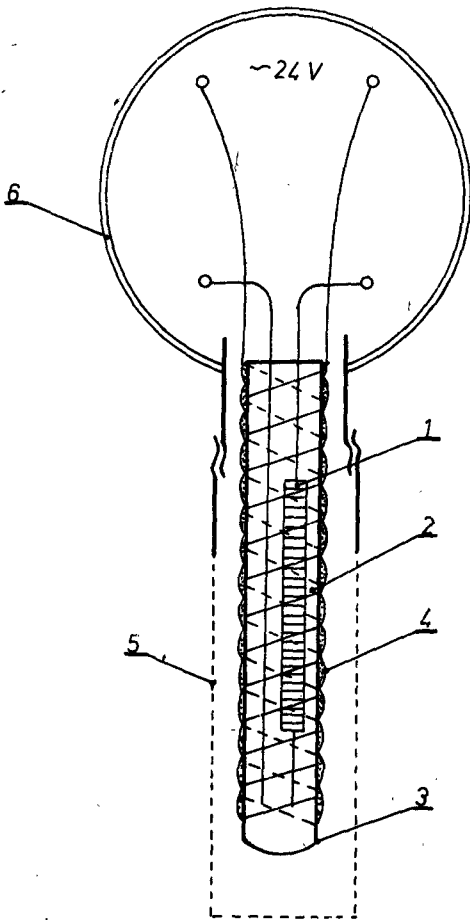
Układ regulacji wilgotności względnej powietrza steruje pracą dysz nawilżających i układu nawilżania i ogrzewania parą wodną bezpośrednio wprowadzaną do powietrza. Stosowane mogą być w obiekcie oba układy jednocześnie lub tylko jeden z nich.

Podstawowym elementem obwodu regulacji wilgotności względnej powietrza jest chlorolitowy czujnik wilgotności względnej. Budowę czujnika przedstawiono schematycznie na rysunku 4. Elementem pomiarowym czujnika jest termometr oporowy PT 100/0°C. Zainstalowany jest on w cylindrze pokrytym warstwą tkaniny szklanej, na której nawinięte są spiralnie dwie elektrody grzejne wykonane ze srebrnego drutu. Tkanina szklana nasycona jest chlorkiem litu /LiCl/. Zespół pomiarowy czujnika umieszczony jest w osłonie połączonej złączem gwintowym z korpusem czujnika. Osłonę wykonano z tworzywa sztucznego i metalowej siatki ochronnej.

Zasada działania chlorolitowego czujnika wilgotności względnej polega na ciągłym pomiarze temperatury nasyconego roztworu LiCl, będącego w równowadze z wilgotnym powietrzem. Roztwór LiCl, którym nasycono warstwę tkaniny szklanej, ogrzewany jest ciepłem wytwarzającym się wskutek przepływu prądu elektrycznego między spiralnymi elektrodami zasilanymi prądem prądu przemiennym o napięciu 24 V i częstotliwości 50 Hz. Prąd płynący przez roztwór powoduje wzrost jego temperatury oraz intensywne odparowywanie z niego wody. Wraz z zateżnieniem roztworu rośnie jego opór elektryczny, wskutek czego maleje natężenie przepływu prądu i obniża się temperatura. Roztwór zaczyna absorbować wodę z otaczającego go powietrza, rezystancja jego zmniejsza się, rośnie przewodzony prąd, a wraz z nim wzrasta temperatura roztworu.

Ilość wody odparowującej z roztworu LiCl lub pobieranej przez niego z powietrza zależy od ciśnienia cząstkowego pary wodnej w otaczającym roztwór powietrzu. Między powietrzem a roztworem ustala się stan równowagi termodynamicznej uwarunkowany wzajemnym oddziaływaniem procesów wymiany

wymiany ciepła i masy. Każdemu stanowi równowagi odpowiada określona wartość ciśnienia cząstkowego pary wodnej w powietrzu, która przy danej temperaturze wyznacza wartość wilgotności względnej powietrza. Temperatura mierzona więc przez termometr PT 100 zainstalowany w czujniku chlorolitowym jest ściśle zależna od wilgotności względnej powietrza otaczającego czujnik. Każda zmiana tej temperatury odpowiada określonej zmianie wilgotności względnej powietrza.



Rys.4. Schemat budowy czujnika chlorolitowego typu CW1

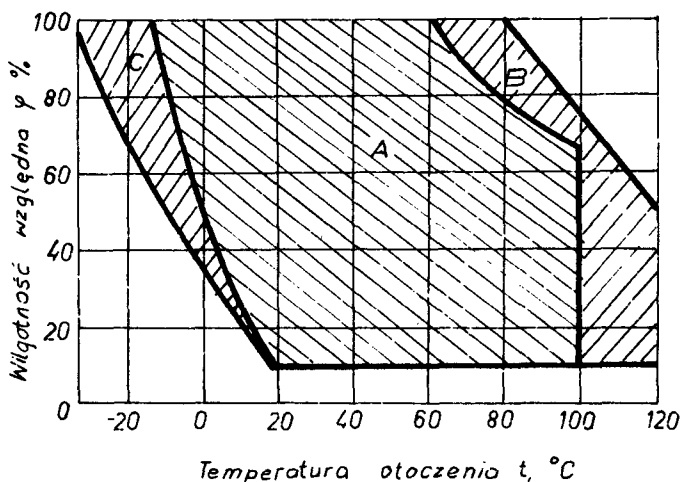
- 1 - termometr oporowy PT 100/°C
- 2 - elektrody grzejne
- 3 - cylinder
- 4 - tkanina z waty szklanej
- 5 - osłona
- 6 - korpus

Zakres działania chlorolitowego czujnika jest ograniczony własnościami fizyko-chemicznymi chlorku litu w różnych zakresach temperatury. LiCl naniesiony na warstwę tkaniny szklanej występuje w postaci soli bezwodnej lub w postaci szeregu soli uwodnionych. Przy pewnych wartościach temperatur istnieje możliwość występowania postaci małowodnych.

Zakres pracy czujnika przedstawiono na rysunku 5. Podzielono go na trzy obszary:

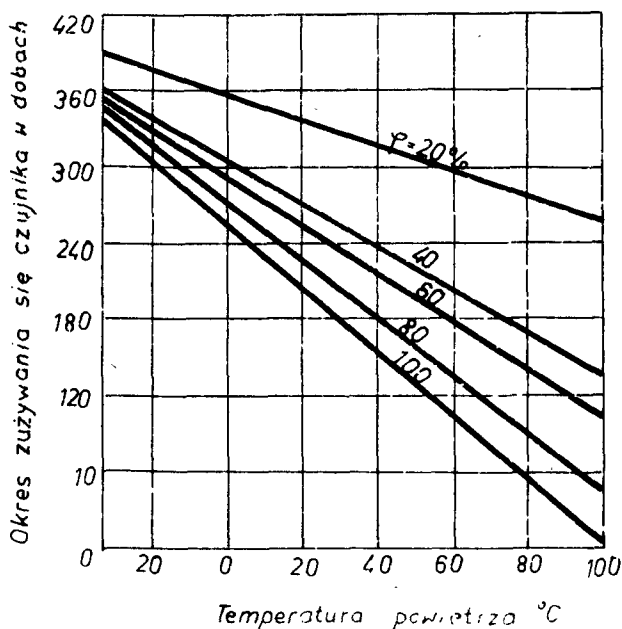
- obszar A obejmuje właściwy zakres pracy,

- obszar B charakteryzuje się małą trwałością czujnika,
- w obszarze C wyniki pomiarów są niepewne ze względu na występowanie niestabilnych kryształów LiCl.



Rys.5. Zakres pracy czujnika CW1

Czas właściwej pracy czujnika maleje ze wzrostem temperatury i wilgotności względnej badanego powietrza. Zależność tę przedstawiono na wykresie zamieszczonym na rysunku 6.



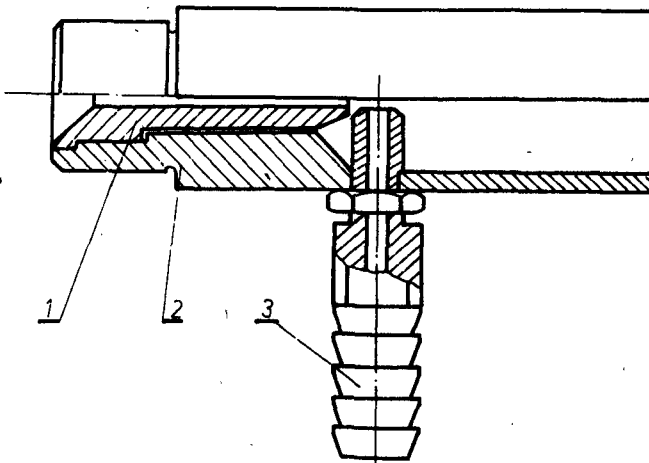
Rys.6. Zależność czasu pracy czujnika od warunków eksploatacyjnych

Czujnik chlorolitowy może pracować z dokładnością pomiaru temperatury $\pm 0,15$ K, co odpowiada błędowi pomiaru wilgotności względnej $\pm 1,5\%$.

Regeneracji czujnika chlorolitowego należy dokonywać w okresach czasu, przedstawionych na wykresie zamieszczonym na rysunku 6, poprzez nawilżenie tkaniny roztworem LiCl, rozprowadzając równomiernie roztwór na powierzchni tkaniny.

Czujnik chlorolitowy współpracuje z dwupołożeniowym elektronicznym regulatorem MC. Regulator ten, wyposażony w sprzężenie zwrotne, steruje pracą trójdrożnego elektromagnetycznego zaworu i w przypadku wilgotności względnej powietrza mniejszej od zadanej wartości, powoduje doprowadzenie powietrza do pneumatycznego siłownika membranowego zaworu regulacyjnego. Otwarcie zaworu regulacyjnego w układzie wykonawczym powoduje dopływ pary grzewczo-nawilżającej lub sprężonego powietrza do dysz nawilżających.

Dysze nawilżające zastosowane w opisywanym układzie zostały zaprojektowane w Instytucie Technologii i Eksploatacji Maszyn ATR w Bydgoszczy. Konstrukcja dysz uwzględnia założenie zapewnienia możliwie dobrego rozpylenia wody w powietrzu. Wybrano w związku z tym, jako typ konstrukcyjny spełniający to założenie, dyszę inżektorową. Budowę jej przedstawiono na rysunku 7.



Rys.7. Dysza inżektorowa do nawilżania powietrza

- 1 - dysza 2 - korpus
3 - króciec doprowadzający wodę

Dysza ma komorę wstępnego mieszania, w której następuje mieszanie się rozpylonych kropeł wody ze strumieniem transportującego je powietrza.

Dysza zasilana jest wodą przez przewód doprowadzający ją ze zbiornika o stałym poziomie. Stały poziom wody w zbiorniku zasilającym dysze nawilżające utrzymywany jest za pomocą pływaka oddziałującego na zawór doprowadzający wodę z sieci do zbiornika.

Ostateczne parametry pracy inżektorowej dyszy nawilżającej ustalono na podstawie wyników badań jej pracy na specjalnie w tym celu zbudowanym stanowisku.

4. PODSUMOWANIE

Opisany wyżej układ może pracować w szerokim zakresie temperatur /278 do 353 K/ i wilgotności względnej powietrza do 100 %.

Pracę układu wypróbowano w stosunkowo trudnych warunkach, instalując go w tunelu do wstępnego dojrzewania płyt azbestowo-cementowych, gdzie utrzymywano temperaturę 323 K i wilgotność względną powietrza większą od 90%. Układ pracował zgodnie z założeniami.

Zastosowanie w nim pneumatycznych przetworników i układów wykonawczych czynią go stosunkowo odpornym na działanie zawartej w powietrzu wilgoci. Ze względu na dużą czułość termometru czujnika chlorolitowego przewód łączący czujnik z regulatorem powinien być połączony bezpośrednio, z pominięciem szyn lub innych elementów pośredniczących. Przewód ten winien być ekranowany, a trasa jego nie powinna przebiegać w bezpośrednim sąsiedztwie innych przewodów elektrycznych.

Należy podkreślić, że układ został wykonany w całości z elementów krajowej produkcji.

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF AIR HUMIDIFICATION AND HEATING

Summary

An automatic control system of air humidification and heating is described. The system is composed of temperature control and registration, relative humidity control and water level in spray snouts control. An application of the chlorolithium sensors for relative humidity measuring and control is presented.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ УВЛАЖНЕНИЯ И ОБОГРЕВАНИЯ ВОЗДУХА

Резюме

Разработано систему автоматической регулировки увлажнения и обогрева воздуха с применением автоматической регулировки выше представленных параметров. Система состоит из следующих обводов: записи и регулировки температуры, регулировки уровня воды в установке снабжающей водой распылительное сопло. В системе для измерения и регулировки относительной влажности применяется хлоролитовый датчик

Andrzej Laskowski

OCENA MOŻLIWOŚCI REGULACJI AUTOMATYCZNEJ KOMFORTU CIEPLNEGO
WEDŁUG TEMPERATURY WYPADKOWEJ JAKO WARTOŚCI ZADANEJ

W pracy przedstawiono wyniki badań modelu analogowego klimatyzowanego pomieszczenia i elektronicznego urządzenia liczącego. Otrzymane krzywe procesów przejściowych pozwalają ocenić stopień dyskomfortu w pomieszczeniu, spowodowanego zakłóceniami i mogą stanowić podstawę dla analizy i syntezy układu regulacji automatycznej komfortu cieplnego według temperatury wypadkowej jako wartości zadanej.

Stan komfortu cieplnego /odczuć cieplnych/ człowieka określony jest wypadkowym oddziaływaniem temperatury, wilgotności względnej i prędkości przepływu powietrza względem ciała ludzkiego oraz średniej temperatury promieniowania otaczających powierzchni. Jako miarę /wyznacznik/ odczuć cieplnych człowieka przyjęto temperaturę wypadkową, która jest funkcją wyżej wymienionych wielkości, a zatem określa ona stan otoczenia

$$T_W = f(t_p, \varphi_p, w_p, t_{mr}) \quad (1)$$

gdzie:

- T_W - temperatura wypadkowa
- t_p - temperatura powietrza w pomieszczeniu
- φ_p - wilgotność względna powietrza w pomieszczeniu
- w_p - prędkość przepływu powietrza względem człowieka
- t_{mr} - średnia temperatura promieniowania otaczających powierzchni

Wartość temperatury wypadkowej można wyznaczyć posługując się specjalnymi nomogramami, przy czym jednostką miary jest $^{\circ}T_W$ /stopień temperatury wypadkowej/.

Badania fizjologiczno-higieniczne, z uwzględnieniem aklimatyzacji człowieka, przeprowadzone przez pracowników naukowych Laboratorium Mikroklimatu Instytutu Naukowo-Badawczego Higieny Transportu Wodnego Ministerstwa Zdrowia ZSRR wspólnie ze specjalistami z Instytutu Medycyny Morskiej PRL pozwoliły na opracowanie nowych normatywów mikroklimatu dla statków i okrętów [5], wykorzystując metodę temperatur wypadkowych. Stanowią one podstawę do obliczeń cieplnych przy projektowaniu i eksploatacji układów klimatyzacji. Według tych norm warunki komfortu cieplnego w pomieszcze-

niach okrętowych określone są wartością zadaną temperatury wypadkowej dla różnych okresów i rejonów żeglugi. Zaznaczyć przy tym należy, że dla danej wartości temperatury wypadkowej komfort cieplny można osiągnąć przez realizację wielu różnych kombinacji zmiennych parametrów t_p , φ_p , w_p , t_{mr} .

Posługiwanie się nomogramem temperatur wypadkowych jest dość skomplikowane i pracochłonne, ponadto dla teorii regulacji automatycznej przydatniejsza jest forma analityczna. Koniecznym więc było otrzymanie zależności matematycznej, pozwalającej wyznaczyć temperaturę wypadkową lub dowolną z jej składowych. Ponieważ wielkość regulowana powinna być wielkością fizyczną, zatem w pracy [2] opisano sposób postępowania i otrzymano wyrażenia analityczne dla statków nieograniczonego rejonu żeglugi w następującej postaci ogólnej

$$t_p = f(TW, \varphi_p, w_p, t_{mr}) \quad (2)$$

W wyrażeniu tym TW traktowana jest jako wartość zadana i stała dla danego rejonu żeglugi.

Przykładowo dla statków nieograniczonego rejonu żeglugi i letniej pory roku /wartość zadana temperatury wypadkowej 24,1^oTW/ zależność funkcjonalna postaci (2) opisana jest równaniem

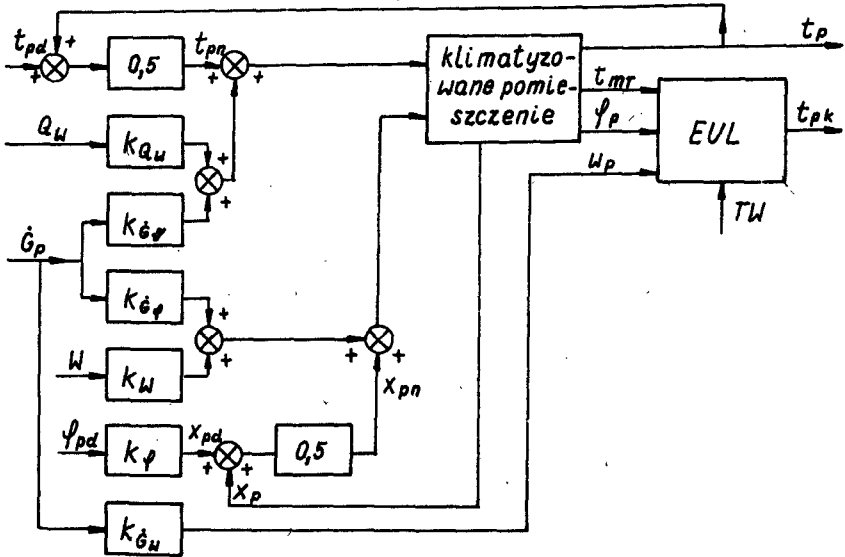
$$t_p = 51,19 + 11,27 w_p - 5,27 w_p^2 - 25,86 \varphi_p + 11,72 \varphi_p^2 + - 0,56 t_{mr} \quad (3)$$

W istniejących okrętowych urządzeniach klimatyzacyjnych regulacji automatycznej podlegają: temperatura i wilgotność względna powietrza. Nie uwzględnia się prędkości przepływu powietrza względem ciała ludzkiego i średniej temperatury promieniowania otaczających powierzchni, które mają istotny wpływ na stan samopoczucia człowieka, jak również ich wzajemnego powiązania [5, 6]. Mając to na względzie, w pracach [3, 4] rozpatrzono i przeanalizowano model matematyczny pomieszczenia okrętowego, pozwalający uzyskać informację o zmianach wszystkich czterech parametrów stanowiących składowe temperatury wypadkowej wskutek zakłóceń zewnętrznych i wewnętrznych.

Uwzględniając powyższe, jak również przeprowadzone wcześniej badania modelowe pomieszczenia okrętowego, autor podjął próbę możliwości wykorzystania kryterium oceny stanu komfortu cieplnego według temperatury wypadkowej dla celów regulacji automatycznej mikroklimatu w pomieszczeniach klimatyzowanych.

Zależności funkcjonalne postaci (2) pozwoliły zaprojektować i zbudować model analogowy elektronicznego urządzenia liczącego. Urządzenie to na podstawie sygnałów uzyskanych z czujników wilgotności względnej i prędkości przepływu powietrza oraz średniej temperatury promieniowania przy zadanej wartości temperatury wypadkowej wypracowuje sygnał proporcjonalny temperaturze powietrza w klimatyzowanym pomieszczeniu, która zapewnia stan komfortu cieplnego dla danej kombinacji zmiennych φ_p , w_p , t_{mr} . Wykorzyst-

tując model matematyczny i schemat blokowy klimatyzowanego pomieszczenia [3, 4], został zaprojektowany jego model analogowy, a przez dołączenie modelu elektronicznego urządzenia liczącego możliwym stało się przeprowadzenie badań mających na celu ocenę możliwości regulacji automatycznej komfortu cieplnego według temperatury wypadkowej TW jako wartości zadanej. Schemat strukturalny układu przedstawiony jest na rysunku 1.



Rys.1. Schemat strukturalny badanego układu

Oznaczenia: EUL - elektroniczne urządzenie liczące;
 t_{pn} - temperatura powietrza nawiewanego; x_p , x_{pn} ,
 x_{pd} - zawartość wilgoci w powietrzu pomieszczenia,
 nawiewanym i za urządzeniem klimatyzacyjnym; k_{Qw} ,
 k_{Gp} , $k_{G\phi}$, k_W , k_ϕ , k_{Gu} - współczynniki wzmacnienia

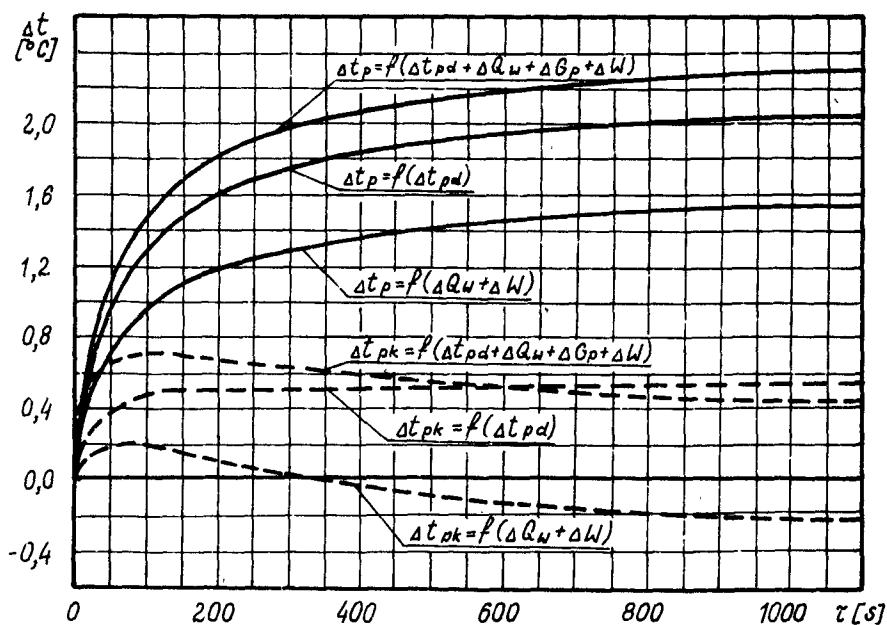
Wprowadzając na wejście badanego obiektu zakłócenia w postaci zmian temperatury, wilgotności względnej i wydatku powietrza nawiewanego oraz ilości ciepła i wilgoci w pomieszczeniu, badano przebiegi zmian rzeczywistej temperatury t_p powietrza w pomieszczeniu i temperatury komfortowej t_{pk} , czyli na wyjściu urządzenia liczącego.

Wielkości zakłóceń były następujące:

- temperatura powietrza za urządzeniem klimatyzacyjnym $-\Delta t_{pd} = \pm 8^\circ\text{C}$,
- ilość ciepła wydzielanego w pomieszczeniu $-\Delta Q_w = 146 \text{ W}$,
- wydatek powietrza nawiewnego $-\Delta \dot{G}_p = \pm 0,013 \text{ kg/s}$,
- ilość wilgoci wydzielanej w pomieszczeniu $-\Delta W = 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ kg/s}$,
- wilgotność względna powietrza za urządzeniem klimatyzacyjnym $-\Delta \phi_{pd} = \pm 4\%$.

Badania pomieszczenia okrętowego, jako obiektu regulacji wraz z elektronicznym urządzeniem liczącym, przeprowadzono metodą strukturalnego modelowania matematycznego na maszynie analogowej typu MN-14, a wyniki rejestrowano za pomocą samopiszącego potencjometru współrzędnościowego typu PDS-021 /produkcji ZSRR/.

Tym sposobem otrzymano szereg krzywych, które stanowią odpowiedź układu na zakłócenia skokowe. Na rysunku 2 przykładowo pokazane są krzywe zmian temperatury rzeczywistej t_p powietrza i komfortowej t_{pk} dla zakłóceń Δt_{pd} , $\Delta Q_w + \Delta W$, $\Delta t_{pd} + \Delta Q_w + \Delta \dot{G}_p + \Delta W$. Zaznaczyć przy tym należy, że krzywe te przedstawiają początek procesu przejściowego, bowiem całkowity proces przejściowy trwa ponad 10 godzin.



Rys.2. Krzywe zmian temperatury rzeczywistej t_p powietrza i komfortowej t_{pk} w klimatyzowanym pomieszczeniu w początkowej fazie procesu przejściowego dla zakłóceń Δt_{pd} , $\Delta Q_w + \Delta W$, $\Delta t_{pd} + \Delta Q_w + \Delta \dot{G}_p + \Delta W$

Na podstawie przytoczonych wyników badań modelowych widać, że już w początkowej fazie procesu przejściowego różnice między rzeczywistą temperaturą t_p powietrza i komfortową t_{pk} są dość istotne i wahają się w granicach $1,5 - 2^{\circ}\text{C}$. Z [1, 5, 6] wynika, że już przy różnicy temperatur wynoszącej 1°C dość znacząco ulega pogorszeniu stan komfortu cieplnego, a zatem i samopoczucia człowieka. Należy również dodać, że w końcowej fazie procesu przejściowego różnice temperatur osiągają wartość $4,5 - 5^{\circ}\text{C}$.

Wyniki otrzymane przez autora w procesie modelowania analogowego zostały potwierdzone eksperymentem przeprowadzonym przez Katedrę Teorii Regulacji Automatycznej i Techniki Obliczeniowej Wyższej Inżynierskiej Szkoły Morskiej w Odessie /ZSRR/ na statku pasażerskim "KAZACHSTAN" w czasie rejsu po Morzu Czarnym. Zgodność danych eksperymentalnych i uzyskanych w procesie modelowania wynosi 75 - 80%.

Tak więc, przeprowadzone badania modelowe układu: klimatyzowane pomieszczenie i urządzenie liczące, pozwalają stwierdzić, że zmiana parametrów mikroklimatu /składowych TW/ wskutek różnych zakłóceń stanowi przyczyną dyskomfortu, bowiem otrzymana kombinacja t_p , φ_p , w_p i t_{mr} nie odpowiada zadanej wartości temperatury wypadkowej. Wielkość dyskomfortu można określić różnicą temperatur t_p i t_{pk} . Osiągnięcie stanu komfortu cieplnego możliwe jest zatem drogą regulacji automatycznej. W tym celu na wejście regulatora proponuje się podawać dwa sygnały: sygnał rzeczywistej temperatury t_p powietrza w pomieszczeniu i temperatury komfortowej t_{pk} , a różnicę ich traktować jako sygnał błędu.

Przytoczone powyżej rozważania mogą stanowić podstawę dla analizy i syntezy układu regulacji automatycznej mikroklimatu w klimatyzowanym pomieszczeniu według temperatury wypadkowej jako wartości zadanej.

Przeanalizowana koncepcja elektronicznego urządzenia liczącego daje możliwość uwzględnienia czterech głównych parametrów, charakteryzujących stan komfortu cieplnego /odczuć cieplnych/ człowieka, przy czym wielkością regulowaną jest temperatura powietrza w klimatyzowanym pomieszczeniu.

Proponowane rozwiązanie dla pomieszczeń okrętowych może być również wykorzystane wszędzie tam, gdzie wymagane jest uwzględnienie maksymalnej ilości czynników mających wpływ na stan samopoczucia człowieka, np. w salach operacyjnych itp.

LITERATURA

- [1] Fanger P.O.: Komfort cieplny. Arkady, Warszawa 1974
- [2] Krinieckij I.I., Laskowski A.: Rasciöt temperatury vozducha v kondicionirujemych pomiescenijach sudov. Cholodilnaja tiechnika, nr 11, 1980
- [3] Krinieckij I.I., Laskowski A.: Dinamiceskije svojstva sudovogo pomiesceniija kak zviena avtomaticeskoj sistiemy regulirovanija. Trudy NKIA, Vyp. 177, Nikolajev 1981
- [4] Laskowski A.: Dynamika zmian temperatury i wilgotności powietrza w klimatyzowanym pomieszczeniu na statku z uwzględnieniem akumulacyjnego wpływu ścian i wyposażenia. Zeszyty Naukowe Nr 89, Mechanika 23, ATR, Bydgoszcz 1981

- [5] Sanitarnyje normy parametrov vozdušnoj sriedy žilych i obscestviennyh pomiescenij morskich sudov, oborudovannyh sistiemami kondicionirovani-ja vozducha. M., Minzdrav 1975
- [6] Zacharov Ju.V.: Sudovyje ustanovki kondicionirovanija vozducha i cholo-dilnyje masiny. L., Sudostrojenie 1979

ESTIMATION OF AUTOMATIC CONTROL OF HEATING ACCORDING
TO RESULTANT TEMPERATURE AS ASSIGNED VALUE

Summary

The author presents the investigation results of an analogue model of the air-conditioned room and the electronic computing device. The obtained curves of transition processes enable an estimation of discomfort rate in the room caused by disturbance and they may be a basis for an analysis and synthesis of the automatic control system of heating comfort according to resultant temperature as the assigned value.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО КОМФОРТА ПО
РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕЙ КАК ЗАДАННОЙ ВЕЛИЧИНЫ

Резюме

В работе представлены результаты исследований аналоговой модели кондиционируемого помещения и электронного вычислительного устройства. Полученные кривые переходных процессов позволяют оценить степень дискомфорта в помещении, вызванного возмущениями и могут составлять основу для анализа и синтеза автоматической системы регулирования теплового комфорта по результирующей температуре в виде заданной величины.

Jan Łukasiewicz

ANALIZA PRZEPIŁYU ZAWIESINY WŁÓKNISTEJ W PRZESTRZENI ROBOCZEJ GENERATORA SZYBKOSMIENNYCH PULSACJI CIŚNIENIA

Opracowano model przepływu zawiesiny włóknistej w szczelinie między perforowanymi tarczami roboczymi generatora szybkozmiennych pulsacji ciśnienia oraz przedstawiono jego analityczny opis.

1. WSTĘP

Rozwłóknianie azbestów w komorze roboczej generatora szybkozmiennych pulsacji ciśnienia połączone jest z przepływem zawiesiny włóknistej przez szczelinę między tarczami roboczymi. Na zawieszynę włóknistą przepływającą przez ten obszar oddziałuje złożony układ sił wywołany pulsacjami ciśnienia, ruchami cząstek zawiesiny i naprężeniami tnącymi, występującymi na ich powierzchniach. Rozwłóknianie metodą generowanych mechanicznie szybkozmiennych pulsacji ciśnienia rozpatrywać należy w połączeniu z przepływem zawiesiny włóknistej w szczelinie między tarczą stałą i wirnikiem generatora.

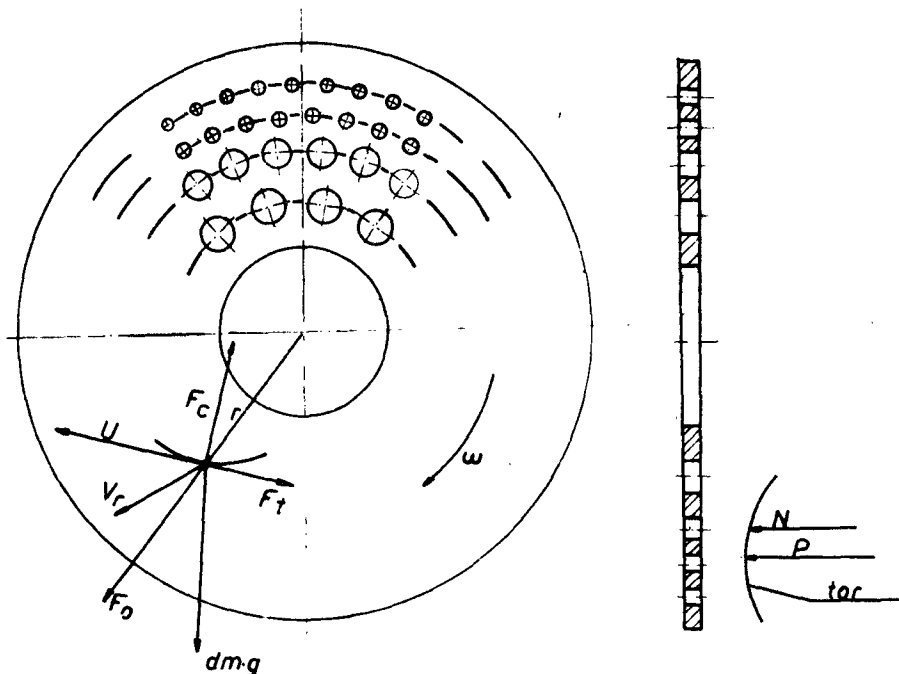
2. PRZEPIŁYW ZAWIESINY W SZCZELINIE MIĘDZY TARCZAMI GENERATORA

Rozpatrując przepływ zawiesiny włóknistej w szczelinie między tarczami generatora, dla uproszczenia zagadnienia przyjęto, że zawieszyna jest cieczą quasihomogeniczną o określonej gęstości i lepkości.

Szybkozmiennie pulsacje ciśnienia są wywoływane przepływem zawiesiny przez obszar szybkozmiennających się objętości kanałów przepływowych. Obszar taki powstaje w wyniku mijania się elementów roboczych - występów lub otworów na wirniku i tarczach stałych generatora.

W szczelinie między tarczami generatora na cząstki zawiesiny działa układ sił przedstawiony na rysunku 1.

Ze względu na nieciągłość powierzchni tarcz, wynikającą z ich perforacji, w szczelinie między nimi występują trudne do analitycznego opisanie pulsacje ciśnienia. Wartości sił przedstawionych na rysunku 1 należy traktować jako chwilowe.



Rys.1. Układ sił działających na element zawiesziny przepływającej w szczelinie między tarczami generatora

- F_c - siła Coriolisa
- F_o - siła odśrodkowa
- F_t - siła styczna do toru ruchu
- N - siła normalna do toru ruchu
- P - siła od ciśnienia statycznego
- ω - prędkość obrotowa

Siła odśrodkowa ma wartość wyrażoną zależnością

$$dF_o = dm \cdot r \cdot \omega^2 \quad (1)$$

gdzie:

- dm - masa rozpatrywanego elementu zawiesziny
- r - promień toru, po którym porusza się element o masie dm
- ω - prędkość obrotowa elementu zawiesziny

Siła Coriolisa określona jest wzorem

$$dF_c = 2 \cdot dm \cdot \vec{v}_r \times \vec{\omega} \quad (2)$$

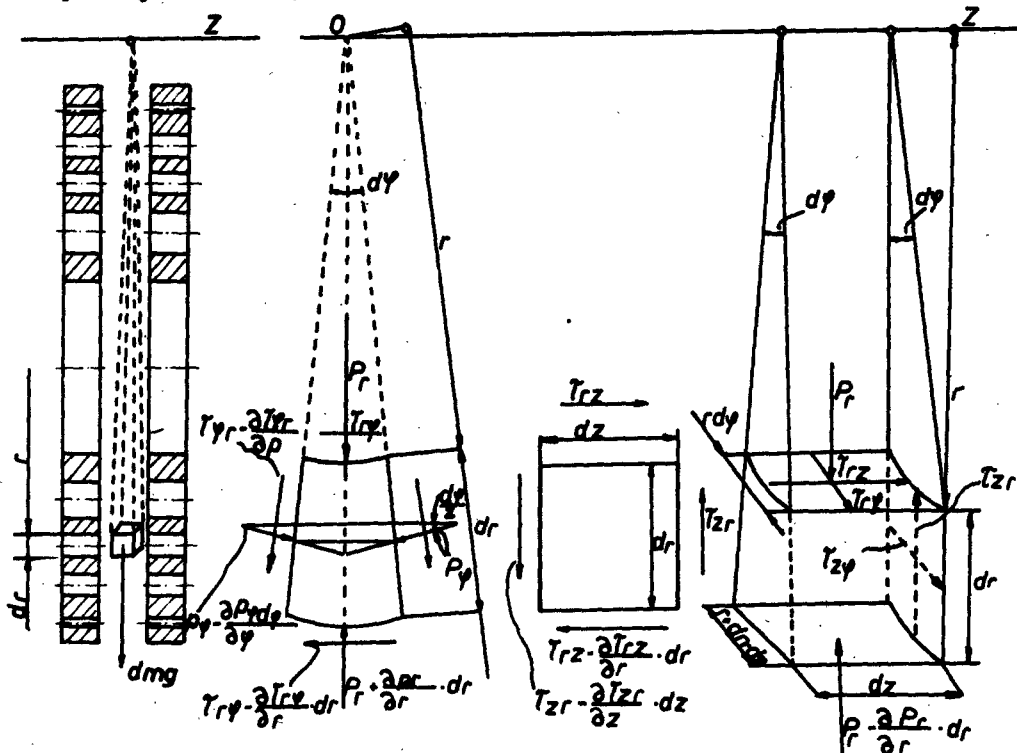
gdzie:

- \vec{v}_r - składowa wektora prędkości elementu masy

Siła normalna N jest proporcjonalna do ciśnienia statycznego w strefie roboczej, działającego na rozpatrywaną cząstkę zawiesziny.

Największą wartość w rozpatrywanym układzie sił mają siły wywołane szybkozmiennymi pulsacjami ciśnienia. Ciśnienie wywołane ich działaniem osiąga wartość rzędu 10 MPa [1], podczas gdy ciśnienia statyczne w strefie roboczej wahają się od 0,1 do 0,2 MPa.

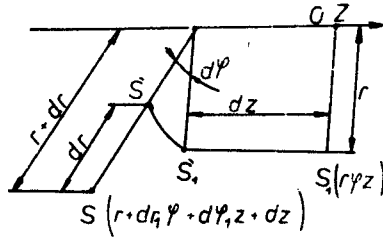
Układ sił działających na cząstki zawiesziny przepływające przez szczelinę między tarczami generatora powodują powstawanie w cieczy złożonego stanu napięcia. Traktując zawieszinę jako medium quasihomogeniczne o stałej gęstości pozornej i cechach płynu lepkosprężystego, przyjęto podany na rysunku 2 układ naprężeń działających na element zawiesziny, wyodrębniony w dowolnym miejscu szczeliny międzytarczowej generatora szybkozmiennych pulsacji ciśnienia.



Rys.2. Układ naprężeń działających na wyodrębniony element zawiesziny, przepływający przez strefę roboczą generatora

- r - współrzędna zgodna z kierunkiem promienia tarcz
- φ - współrzędna kątowa
- $r \cdot \varphi$ - kierunek styczny do obwodu tarcz
- z - współrzędna równoległa do osi obrotu wirnika
- τ - naprężenia styczne
- p - naprężenia normalne

Przemieszczenia rozpatrywanego elementu w nieskończeniu krótkim czasie dt przedstawiono na rysunku 3.

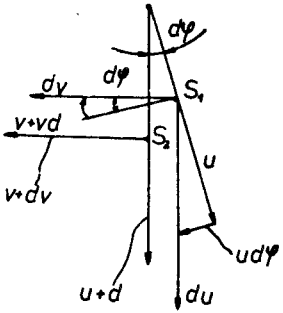


Rys.3. Przemieszczenie elementu masy w czasie dt

S_1 - początkowe położenie środka masy

S_2 - położenie środka masy odpowiadające nieskończenie małym przyrostom współrzędnych dr , $d\varphi$, dz

Zmiany prędkości ruchu rozpatrywanego elementu, odpowiadające zmianom jego położenia, przedstawiono na rysunku 4. Wartości \dot{u} i \dot{v} oraz prostopad-



ły do nich wektor \vec{w} są składowymi wektora prędkości \vec{V} odpowiednio na kierunki współrzędnych określających położenie elementu. Wartość tych współrzędnych określić można ogólnymi zależnościami

$$u = f_1(t, r, \varphi, z) \quad (3)$$

$$v = f_2(t, r, \varphi, z) \quad (4)$$

$$w = f_3(t, r, \varphi, z) \quad (5)$$

Rys.4. Zmiana prędkości ruchu elementu masy, odpowiadająca zmianom położenia u , v , w - składowe wektora prędkości V na kierunki r , φ , z

Siły działające na wyodrębniony element podzielono na: siły masowe, siły powierzchniowe i siły bezwładnościowe. Do sił masowych nale-

żą siły ciężkości elementu $g \cdot dm$, do sił bezwładnościowych - siły pochodzące od przyspieszenia odśrodkowego i przyspieszenia Coriolisa, a do sił powierzchniowych należą siły wywołane oddziaływaniem ciśnienia zarówno statycznego, jak i zmiennego.

W dalszych rozważaniach ciśnienie oddziaływujące na rozpatrywany element zawieszony potraktowano sumarycznie.

Posługując się cylindrycznym układem współrzędnych napisano równania równowagi rozpatrywanego elementu masy. Mają one postać

$$F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial r} \cdot u + \frac{\partial w}{r \partial \varphi} \cdot v + \frac{\partial w}{\partial z} \cdot w \quad (6)$$

$$F_\varphi - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{r \partial \varphi} = \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial r} \cdot u + \frac{\partial v}{r \partial \varphi} \cdot v + \frac{\partial v}{\partial z} \cdot w + \frac{u \cdot w}{r} \quad (7)$$

$$F_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial r} \cdot u + \frac{\partial u}{r \partial \varphi} \cdot v + \frac{\partial u}{\partial z} \cdot w - \frac{v^2}{r} \quad (8)$$

gdzie:

F_z, F_φ, F_r - składowe sił masowych na kierunku osi z, współrzędnej φ i promienia r

$\frac{v}{r} = \frac{d\varphi}{dt}$ - prędkość kątowna chwilowego obrotu elementu zawiesiny

$dm \cdot \frac{u \cdot v}{r}$ - siła bezwładności Coriolisa powstająca przy ogólnym ruchu cieczy wskutek zmiany kierunku prędkości promieniowej przy przejściu od punktu S_1 do punktu S_2

$dm \cdot \frac{v^2}{r}$ - bezwładnościowa siła odśrodkowa występująca przy chwilowym obrocie elementu

Reologiczne równanie stanu wiążące stan naprężenia w cieczy z odkształceniami i prędkościami odkształceń jej elementów przybiera postać

$$f(\{P'\}, \{\gamma\}, \{\dot{\gamma}'\}) = 0 \quad (9)$$

gdzie:

$\{P'\}$ - tensor naprężeń stycznych
 $\{\gamma\}$ - tensor deformacji
 $\{\dot{\gamma}'\}$ - tensor prędkości deformacji

Na podstawie rozważań nad własnościami reologicznymi zawiesin włóknistych, O.A. Terentiev 3, 4 określił równanie umożliwiające opisanie składowych tensora $\{P'\}$. Ma ono postać

$$\{P'\} = \sum_{k=1}^{n+1} A_k \cdot \exp(-\alpha_k \cdot \dot{\gamma}'_{ij} + \eta \cdot \dot{\gamma}'_{ij}) \quad (10)$$

gdzie:

A_k - współczynnik, którego wartość można wyznaczyć doświadczalnie
 α_k - wykładnik potęgi wyznaczany doświadczalnie
 η - pozorna lepkość dynamiczna zawiesiny włóknistej

Korzystając z powyższego równania, składowe tensora naprężeń stycznych przedstawiono w postaci funkcjonalnej

$$\tau_{ij} = f(\dot{\gamma}'_{ij} + \eta \cdot \dot{\gamma}'_{ij}) \quad (11)$$

gdzie:

$$f(\dot{\gamma}'_{ij}) = \sum_{k=1}^{n+1} A_k \cdot \exp(-\alpha_k \cdot \dot{\gamma}'_{ij})$$

Składowe $\dot{\gamma}'_{ij}$ tensora prędkości deformacji $\{\dot{\gamma}'\}$ we współrzędnych cylindrycznych mają postać

$$\gamma'_{rr} = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \gamma'_{\varphi\varphi} = \frac{\partial v}{r \partial \varphi} + \frac{u}{r}, \quad \gamma'_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\gamma'_{r\varphi} = \frac{\partial u}{r \partial \varphi} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r}, \quad \gamma'_{\varphi z} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{r \partial \varphi}$$

$$\gamma'_{zr} = \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z}$$

W oznaczeniach składowych tensora prędkości deformacji przyjęto, że wskaźnik "i" oznacza płaszczyznę prostopadłą do kierunku współrzędnej i, a wskaźnik "j" określa, że działająca w tej płaszczyźnie składowa tensora jest równoległa do określonej tym symbolem płaszczyzny.

Ogólne równanie ruchu, będące równaniem równowagi sił działających na rozpatrywany element zawiesziny włóknistej, ma w postaci geometrycznej zapis noszący nazwę równania Naviera-Stokesa

$$\rho \cdot \frac{D\bar{v}}{Dt} = \rho \cdot \bar{F} - \text{grad } P + \text{Div } \{P'\} \quad (12)$$

Po rozpisaniu tego równania w układzie współrzędnych cylindrycznych oraz uwzględnieniu w jego zapisie składowych tensora naprężeń otrzymano przedstawione niżej zależności, opisujące ruch elementu zawiesziny włóknistej

a/ dla kierunku promienia r

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial r} \cdot u + \frac{\partial u}{\partial \varphi} \cdot \frac{v}{r} + \frac{\partial u}{\partial z} \cdot w - \frac{v^2}{r} \right) = \rho \cdot \bar{F}_r - \frac{\partial p}{\partial r} + \\ & + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \varphi} - \frac{u}{r^2} \right) + \\ & + \sum_{k=1}^{n+1} \alpha_k \cdot A_k \times \left\{ 2 \exp \left(-\alpha_k \frac{\partial u}{\partial r} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \exp \left[-\alpha_k \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} + \right. \right. \right. \right. \\ & + \left. \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right) \times \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial r \partial \varphi} - \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right) + \exp \left[-\alpha_k \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \right. \right. \right. \\ & + \left. \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \cdot \left(\frac{\partial^2}{\partial r \partial z} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \left. \right\} + \frac{2}{r} \sum_{k=1}^{n+1} A_k \left\{ \exp \left(-\alpha_k \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \right. \\ & \left. - \exp \left[-\alpha_k \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \varphi} + \frac{u}{r} \right) \right] \right\} \quad (13) \end{aligned}$$

b/ dla kierunku stycznego do łuku $r \cdot d\varphi$

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial r} \cdot u + \frac{\partial v}{\partial \varphi} \cdot \frac{v}{r} + \frac{\partial v}{\partial z} \cdot w + \frac{u \cdot v}{r} \right) = \rho \cdot \bar{F}_\varphi + \\ & - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \varphi} + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{v}{r^2}) - \sum_{k=1}^{n+1} \alpha_k \cdot A_k \left\{ \exp \left[-\alpha_k \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right) \right] \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial \varphi} + \right. \right. \\
 & - \frac{1}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \varphi} + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot v \right) + \frac{2}{r} \exp \left[-\alpha_k \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \varphi} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{u}{r} \right) \right] \cdot \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2 v}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right) + \exp \left[-\alpha_k \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right) \right] \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi \partial z} \right) \left. \right\} + \frac{2}{r} \sum_{k=1}^{n+1} A_k \cdot \exp \left[-\alpha_k \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{14}$$

c/ dla kierunku osi z

$$\begin{aligned}
 & \rho \cdot \bar{F}_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \\
 & - \sum_{k=1}^{n+1} \alpha_k \cdot A_k \left\{ \exp \left[-\alpha_k \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial z} \right) + \right. \\
 & + \frac{1}{r} \exp \left[-\alpha_k \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right) \right] \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial z \partial \varphi} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} \right) + \\
 & \left. + 2 \exp \left(-\alpha_k \frac{\partial w}{\partial z} \right) \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right\} + \frac{1}{r} \sum_{k=1}^{n+1} A_k \cdot \exp \left[-\alpha_k \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{15}$$

Dodatkowym równaniem opisującym ruch zawiesziny jest równanie ciągłości przepływu, którego zapis dla rozpatrywanego przypadku ma postać

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \varphi} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{u}{r} = 0 \tag{16}$$

Przedstawiony układ równań ujmuje ogólne zależności między parametrami przepływu zawiesziny włóknistej w szczelinie między perforowanymi tarczami generującymi szybkozmienne pulsacje ciśnienia.

Ze względu na bardzo złożony przebieg zjawisk zachodzących w komorze roboczej generatora ustalenie warunków brzegowych umożliwiających rozwiązanie układu powyższych równań jest zagadnieniem trudnym do realizacji. Wprowadzenie uproszczeń do przyjętego modelu opisu analitycznego przepływu dałoby z kolei rozwiązania odbiegające od rzeczywistych zależności między parametrami określającymi rozpatrywane zjawisko.

Rozwiązanie zagadnienia należy więc dokonać na drodze doświadczalnej. Na podstawie równań opisujących przepływ zawiesziny włóknistej w szczelinie między perforowanymi tarczami ustalone parametry wywierające znaczący wpływ na przebieg zachodzących tu zjawisk. Należą do nich: gęstość zawie-

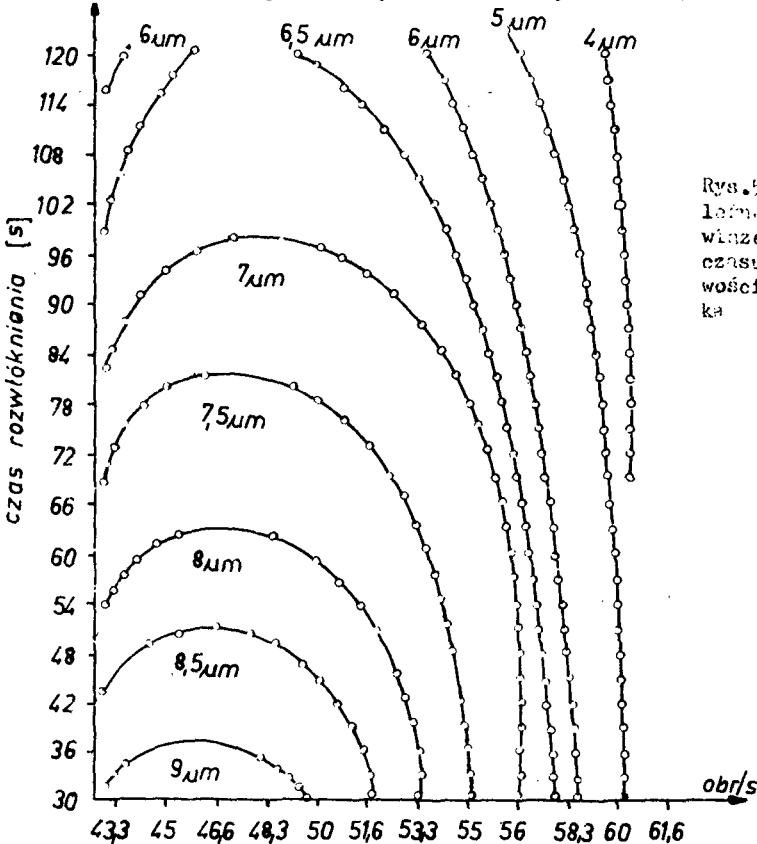
siny , prędkość kątowna wirnika, pozorna lepkość zawiesiny oraz naprężenia styczne w zawieszynie, wyrażone poprzez ich składowe na osi przyjętego układu współrzędnych. Pozorna lepkość zawiesiny , występująca w wyrażeniu opisującym wartość tensora naprężeń stycznych, zależna jest od stężenia włókien w zawieszynie, ich postaci określonej grubością i długością wiązek włókien oraz od temperatury zawiesiny.

Na podstawie przeprowadzonej analizy równań ruchu opisujących przepływ zawiesiny w szczelinie między tarczami roboczymi generatora określono parametry pracy urządzenia, między którymi należy ustalić doświadczalnie zachodzące zależności. Należą do nich:

- częstość obrotów wirnika,
- stężenie włókien w zawieszynie,
- grubość wiązek włókien przed i po obróbce,
- temperatura zawiesiny,
- czas rozwiókniania.

Dla ustalenia zależności między wymienionymi wyżej parametrami pracy generatora szybkozmiennych pulsacji przeprowadzono badania rozwiókniania w specjalnie zbudowanym laboratoryjnym generatorze.

Na rysunku 5 zamieszczono wykres przedstawiający wyniki analizy statystycznej wartości pomierzonych w czasie tych badań parametrów 1, 4.



Rys. 5. Przebieg zależności grubości wiązek włókien od czasu i częstości obrotów wirnika

Wykres przedstawia zależność między średnią grubością wiązek włókien, liczbą obrotów wirnika oraz czasem rozwióknienia. Linie warstwic na wykresie odpowiadają średnim wartościom grubości wiązek włókien.

3. WNIOSKI

Rozpatrywanego przepływu zawiesiny włóknistej między perforowanymi tarczami mechanicznego generatora szybkozmiennych pulsacji ciśnienia nie można opisać równaniem Naviera Stokesa, zmodyfikowanym przez wprowadzenie do niego zależności ujmujących wiasności zawiesiny. Przedstawione równanie może służyć jedynie dla określenia, które z parametrów wywierających wpływ na rozwióknianie należy rozpatrywać w badaniach procesu.

Z dokonanych badań wynika, że za najkorzystniejszą ze względu na osiągane wartości parametrów określających stopień rczwióknienia badanej zawiesiny azbestów przyjąć należy częstość pulsacji ciśnienia, odpowiadającą liczbie obrotów wirnika w granicach od 48,2 do 60 obr/s.

4. LITERATURA

- [1] Łukasiewicz J.: Rozwióknianie azbestów generowanymi mechanicznie szybkozmiennymi pulsacjami ciśnienia /praca niepublikowana/. Łódź 1980
- [2] Szymański M., Łukasiewicz J.: Badania nad rozwióknianiem azbestów generowanymi mechanicznie pulsacjami ciśnienia. Przegląd Papierniczy, nr 5-6, 1982
- [3] Terentiev O.H.: Hydrodynamika wołóknistych suspienizj. Cz.I, Lenin-grad 1972
- [4] Terentiev O.H.: Hydrodynamika wołóknistych suspienizj. Cz.II, Lenin-grad 1974

FIBROUS SUSPENDED MATTER FLOW ANALYSIS IN WORKING SPACE OF HIGH FREQUENCY PRESSURE GENERATOR

Summary

The paper describes a theoretical model of the fibrous suspended matter flow between perforated disks of the high frequency pressure generator.

АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЯ ВОЛОКНИСТОЙ СУСПЕНЗИИ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ ГЕНЕРАТОРА
СКОРОСМЕННЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ

Резюме

Представлена модель течения волокнистой суспензии в щели между перфорированными рабочими дисками генератора скоросменных пульсаций давления и выполнено его аналитическое описание.

Marian Szymański
Jan Łukasiewicz

ROZWŁÓKNIANIE AZBESTÓW Z ZASTOSOWANIEM KAWITACJI HYDRODYNAMICZNEJ

Opisano badania nad rozwłóknianiem azbestów kawitacją hydrodynamiczną oraz omówiono ich wyniki.

1. WSTĘP

Rozwłóknianie surowców włóknistych jest operacją energochłonną oraz w znacznym stopniu wpływającą na własności obrabianego surowca. Stosowane przemysłowe metody rozdziału skupisk włókien polegają na obróbce surowca przeprowadzonego w stan zawiesiny wodnej. Rozdział pęczków i wiązek włókien powodowany jest jednoczesnym oddziaływaniem mechanicznym elementów roboczych maszyn oraz hydrodynamicznym, związanym z ruchem zawiesiny włóknistej. Duża część energii doprowadzanej do maszyn rozwłókniających zużywana jest na wywołanie zjawisk towarzyszących rozwłóknianiu, a więc zawirowań, cyrkulacyjnych przepływów cieczy, pokonywania oporów tarcia mechanicznego i hydromechanicznego.

Mechaniczne oddziaływanie elementów roboczych na rozwłókniany surowiec powoduje również bardzo często niepożądane uszkodzenia włókien w postaci ich łamania i skracania. Zjawiska te występują zarówno przy rozwłóknianiu masy celulozowej i makulatury, jak i azbestów. Szczególnie intensywnie występują jednak przy rozwłóknianiu azbestów, gdyż włókna tego minerału są mniej elastyczne i wykazują znacznie mniejszą odporność na zginanie niż włókna celulozowe.

Poszukując metod umożliwiających zmniejszenie zużycia energii i zapewniających korzystniejsze warunki obróbki, przeprowadzono badania nad zastosowaniem do rozwłókniania azbestów kawitacji hydrodynamicznej.

Pomysł zastosowania kawitacji hydrodynamicznej do rozwłókniania surowców włóknistych został opatentowany w Polsce w roku 1978 przez prof. dr inż. Stanisława Kuczewskiego, dr inż. Tomasza Tyralskiego i mgr inż. Zbigniewa Krzewińskiego /patent nr 98840/. Pierwsze doświadczalne próby nad rozwłóknianiem tą metodą makulatury przeprowadzono w Instytucie Papiernictwa i Ma-

szyn Papierniczych Politechniki Łódzkiej na specjalnie zbudowanym stanowisku.

2. BADANIA NAD ROZWIÓKNIANIEM AZBESTÓW KAWITACJĄ HYDRODYNAMICZNĄ

Badania nad rozwióknianiem azbestów kawitacją hydrodynamiczną przeprowadzono w Instytucie Papiernictwa i Maszyn Papierniczych Politechniki Łódzkiej na stanowisku badawczym zaprojektowanym i wykonanym przez pracowników tej Uczelni, a udostępnionym autorom niniejszego opracowania.

Rozwióknianie azbestów za pomocą wytworzonej hydrodynamicznie kawitacji przeprowadzono dla określenia skutków oddziaływania tego zjawiska na skupiska włókien oraz zbadania możliwości zastosowania go w praktyce przemysłowej. Przeprowadzone badania miały umożliwić dobór najkorzystniejszych ze względu na efekty rozwiókniania parametrów pracy kawitatora.

Schemat technologiczno-pomiarowy stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 1. Zainstalowany w stanowisku kawitator hydrodynamiczny zbudowany jest z cylindrycznego korpusu, wewnątrz którego zamontowano wymienną dyszę kawitacyjną.

Do badań nad rozwióknianiem azbestów zastosowano dyszę o kształcie przedstawionym na rysunku 2. Dysza ta wytwarzała najintensywniej zjawisko kawitacji ze wszystkich rodzajów dysz stosowanych w użytym do badań kawitatorze.

Strumień zawiesziny włóknistej azbestów tłoczony przez pompę kawitatora wypływając z dyszy osiąga prędkość powodującą obniżenie ciśnienia statycznego do wartości ciśnienia wrzenia wody w temperaturze, przy której odbywa się przepływ przez dyszę. Powoduje to powstawanie w obszarze granicznym z wylotem dyszy kawitatora pęcherzyków pary wodnej, które następnie implodują przy przepływie do obszarów o wyższym ciśnieniu.

Na intensywność i wymiary obszaru kawitacji można oddziaływać zasuwami regulacyjnymi, zainstalowanymi przed i za kawitatorem.

Zawieszina azbestów po przepłynięciu przez kawitator odprowadzana była do kadzi masy rozwiókniającej.

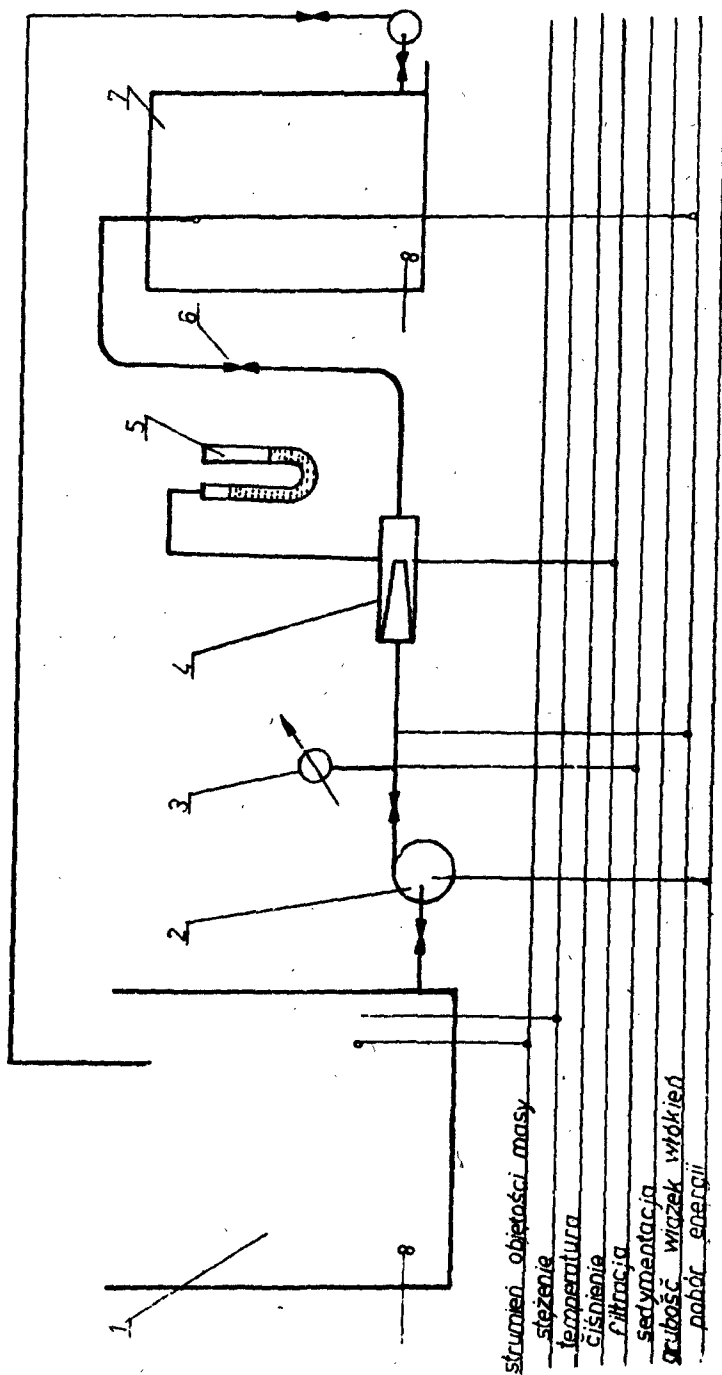
Na rurociągu tłoczącym masę do kawitatora, za pompą tłoczącą zainstalowano zamykany kurkiem króciec do pobierania próbek masy nierozwióknionej.

Do pomiaru ciśnienia statycznego przy wylocie dyszy kawitatora zainstalowany był rtęciowy manometr różnicowy, którym mierzono różnicę między ciśnieniem atmosferycznym a ciśnieniem wytworzonym w zawieszinie w obszarze wylotu dyszy.

Na króćcu tłocznym pompy zasilającej kawitator zainstalowano manometr do pomiaru ciśnienia wytwarzanego przez pompę.

Do badań zastosowano mieszaninę azbestów chryzotylowych o podanym niżej składzie wagowym:

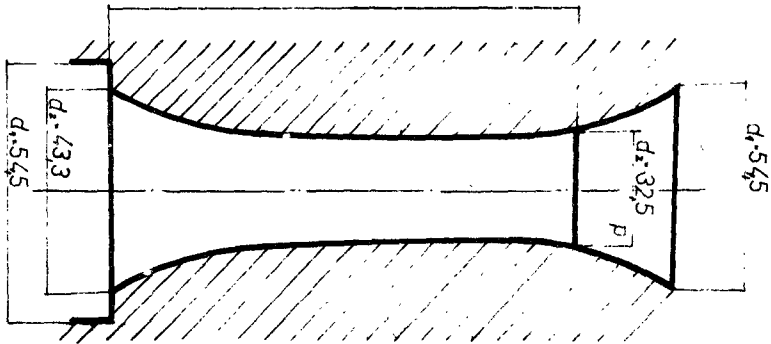
azbest P-3-60	-	31	%
azbest P-6-45	-	37,4	%
azbest P-4-30	-	31,3	%



Rys.1. Schemat technologiczno-pomiarowy stanowiska do badań nad rozwódknaniem zawieszin włóknistych kawitacją hydrodynamiczną

1 - kadź masy nierozwódknionej, 2 - pompa, 3 - manometr, 4 - kawitator, 5 - manometr różnicowy, 6 - zawór, 7 - kadź masy rozwódknionej

l-201



Rys.2. Kształt dyszy generującej kawitację

Wpływ stężenia zawiesiny na efekty rozwiókniania azbestów badano przy zachowaniu stałych wartości następujących parametrów: strumienia objętości zawiesiny, ciśnienia przed i za kawitatorzem, temperatury zawiesiny.

Przed przystąpieniem do badań sporządzono zawiesinę azbestów w wodzie, zasypując odważony wsad azbestów do kadzi masy nierozwióknionej. Po dodaniu określonej ilości wody koniecznej do otrzymania zawiesiny o największej wartości stężenia przewidzianego programem badań, zawartość kadzi mieszano zainstalowanym w niej mieszadłem śmigłowym. Po wymieszaniu zawiesiny otworzono zasuwę na króćcu ssawnym pompy kawitatora i uruchomiono silnik napędowy pompy. Warunki pracy instalacji ustalały się po 2 + 3 s od chwili uruchomienia silnika.

Próbki zawiesiny do oznaczeń własności rozwióknianych azbestów pobierano jednocześnie przed i za kawitatorzem oraz z kadzi masy nierozwióknionej po okresie 20 s pracy pompy. Czas pomiaru nie przekraczał 30 s.

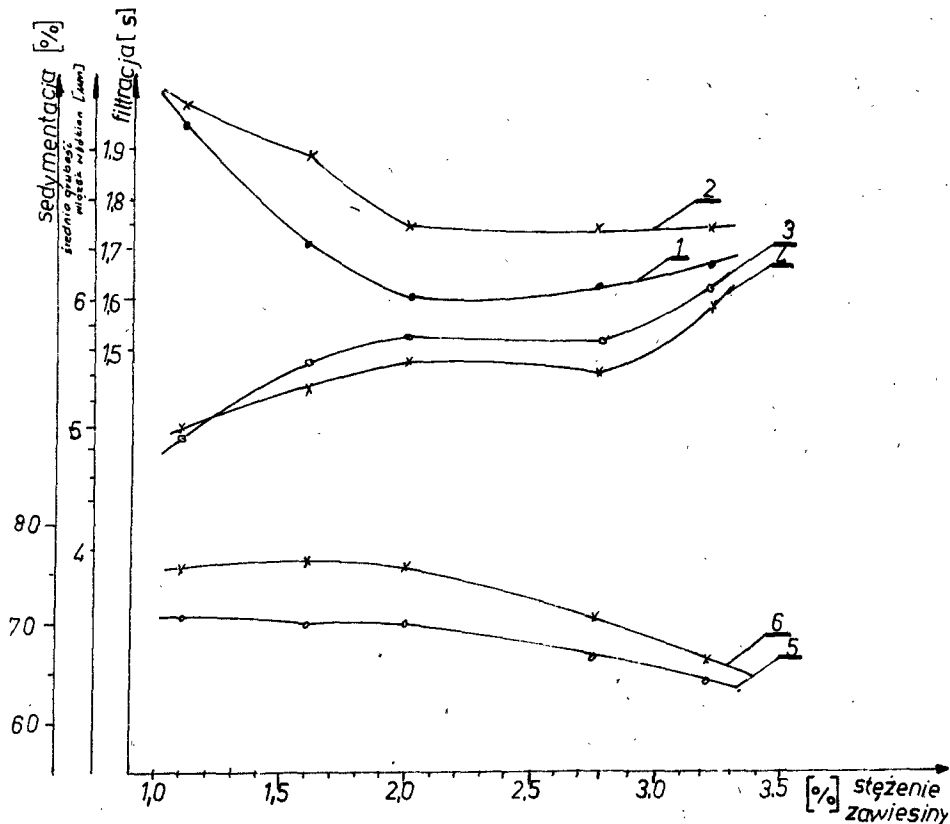
Po dokonaniu pomiaru dla największej wartości stężenia zawiesinę w kadzi masy nierozwióknionej rozcieńczano kolejno do wartości stężeń mniejszych, prowadząc pomiary w sposób opisany wyżej.

Efekty obróbki azbestu w kawitatorze oceniano na podstawie oznaczeń wartości filtracji i sedymentacji oraz pomiarów grubości wiązek włókien azbestów wykonywanych na próbkach masy włóknistej, pobieranych przed i za kawitatorzem. Wartość filtracji i sedymentacji azbestu oznaczano zgodnie z normą BN-66/6750-02. Grubość wiązek włókien azbestu określano na podstawie bezpośrednich pomiarów mikroskopowych, których wyniki opracowano statystycznie, obliczając średnią grubość wiązek włókien, odchylenie standardowe i współczynnik zmienności.

Ciśnienie na przewodzie tłocznym pompy zasilającej kawitator mierzono manometrem sprężynowym. Wartość jego wynosiła 0,6 MPa. Wartość ciśnienia przy wylocie z dyszy kawitatora określano na podstawie pomierzonej różnicy ciśnienia barometrycznego i ciśnienia przy wylocie dyszy.

Wartość strumienia objętości zawiesiny określano na podstawie pomiarów różnicy poziomów zawiesiny w kadzi masy nierozwióknionej przed i po pomiarze oraz czasu trwania pomiaru.

Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 1 /podane wartości są wartościami średnimi/ oraz na wykresach zamieszczonych na rysunku 3.



Rys. 3. Przebieg zmian filtracji, sedymentacji i grubości wiązek włókien azbestu przed i po obróbce w instalacji kawitatora w zależności od stężenia zawiesiny

- 1, 2 - linie przebiegu zmian filtracji
 3, 4 - linie przebiegu zmian grubości wiązek włókien
 5, 6 - linie przebiegu zmian sedymentacji

Przyrost filtracji oraz sedymentacji zawiesiny w kadzi mieszalnej jest powodowany oddziaływaniem na magazynowaną w niej zawieszynę mieszadła.

Na wykresach zamieszczonych na rysunku 3 przedstawiono przebieg zmian filtracji, sedymentacji i średniej grubości wiązek włókien azbestów powodowany obróbką w kawitatorze z pominięciem oddziaływania pompy przy różnych stężeniach zawiesiny.

Na podstawie przedstawionych wyżej wyników stwierdzono, że zmiany wartości badanych parametrów powodowane oddziaływaniem pompy zasilającej kawitator są znacznie większe niż zmiany wywołane działaniem samej jego dyszy.

Tabela 1

Wyniki pomiarów stopnia rozwłóknienia azbestu przed i po obróbce w kawatatorze

Ip.	Stężenie zawiesiny %	Ciśnienie za kawatorem Pa	Miejsce pobrania próbki												
			Kadź mieszalna			Przed kawatorem			Za kawatorem						
			Filtracja s	Sedymentacja %	Średnia grubość włókien um	Filtracja s	Sedymentacja %	Średnia grubość włókien um	Filtracja s	Sedymentacja %	Średnia grubość włókien um				
1	3,205	195	104,3	38,6	7,0										
2	3,21	195	106,3	39,0	7,0	167,6	64,3	5,19	174,6	67,3	5,90				
3	2,75	196	107,6	40,3	7,1	163,0	67,6	5,64	174,3	71,0	5,40				
4	1,99	196	110,0	40,6	7,0	160,3	70,3	5,73	174,3	77,0	5,49				
5	1,54	197	112,0	42,3	7,0	172,6	70,0	5,49	188,3	75,0	5,31				
6	1,12	197	112,3	42,6	7,0	195,0	71,3	4,92	199,3	76,0	4,94				

Największe przyrosty wartości filtracji w instalacji kawitatora uzyskiwano przy małych wartościach stężenia zawiesiny: przy stężeniu 1,1 % wartość tego wskaźnika zmieniła się ze 112 s do 199 s, natomiast przy stężeniu 3,2 % następowała zmiana ze 106 s na 175 s. Zmiana filtracji powodowana oddziaływaniem tylko samej dyszy kawitatora, określona na podstawie oznaczeń własności próbek zawiesiny pobranych bezpośrednio przed i za kawitorem, jest znacznie mniejsza. W zakresie stosowanych w badaniach stężeń zawiesiny wynosiła ona około 15 s. Wartość tę uzyskiwano przy stężeniu 1,57 %.

Zmiany sedimentacji wywołane obróbką w badanej instalacji miały w przybliżeniu wartość stałą, niezależną od stężenia obrabianej zawiesiny. Wartość tego wskaźnika zmieniała się z 38,6 % do 77 %. Przyrost sedimentacji powodowany oddziaływaniem samej tylko dyszy kawitatora wynosi średnio dla badanego zakresu stężeń zawiesiny około 4,3 %.

Największe zmiany średniej grubości wiązek włókien azbestów - 2,3 mikrometra - uzyskane w instalacji, stwierdzono przy stężeniu zawiesiny równym 1,12 %. Przy przepływie zawiesiny przez obszar dyszy kawitatora następowały jedynie nieznaczne zmiany średniej grubości wiązek włókien rzędu 0,2 μm .

3. WNIOSKI

Wartość ciśnienia przy wylocie dyszy kawitatora równa 196 Pa odpowiada przy pomierzonej temperaturze zawiesiny równej 17°C ciśnieniu wrzenia. Kawitator stwarza więc warunki powstawania kawitacji. Występowanie tego zjawiska w przepływającej zawieszynie potwierdzone było także wystąpieniem charakterystycznych dla tego zjawiska efektów akustycznych.

Rozwłóknianie azbestów za pomocą kawitacji hydrodynamicznej w zakresie parametrów stosowanych w przeprowadzonych badaniach nie zapewnia wystarczającego dla celów przemysłowych stopnia rozwłóknienia.

Obszar kawitacji wytworzony za dyszą kawitatora ma zbyt małą intensywność oddziaływania na wiązki i skupiska włókien.

Dla zwiększenia intensywności oddziaływania kawitatora należałoby zastosować pompę o większej wysokości podnoszenia i zapewnić odpowiedź nie obrabianej zawiesiny.

Przeprowadzone badania są wstępną próbą rozwłókniania azbestów za pomocą kawitacji hydrodynamicznej. Ponieważ nieznane jest zachowanie się włókien azbestu w obszarze kawitacji oraz ich oddziaływanie na zachodzące tu implozje, nie można wyników z badań rozwłókniania masy celulozowej i makulatury oraz innych surowców włóknistych porównywać bezpośrednio z rezultatami uzyskanymi przy obróbce azbestów. Dla ustalenia parametrów rozwłókniania azbestów należy przeprowadzić dalsze uzupełniające badania.

CAVITATION AIDING DEFIBERING OF FIBROUS MATERIALS

Summary

The paper describes hydrodynamic cavitation aiding defibering of asbestos. Some results of the experimental works are presented.

РАСПУШИВАНИЕ АСБЕСТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ

Резюме

Описаны исследования распушивания асбестов с применением гидродинамической кавитации и рассмотрены их результаты.

Andrzej Topoliński

ROZKŁAD TEMPERATURY W LAMINARNYM PRZEPIŁYWE ELEKTROLITU W SZCZELINIE MIĘDZYELEKTRODOWEJ

W pracy rozważa się stacjonarny przepływ lepkiej, niesciśliwej i elektroprzewodzącej cieczy między równoległymi, płaskimi elektrodami. Do opisu problemu zastosowano równania ciągłości, transportu pędu i ciepła. W rozwiązaniu posłużono się przybliżeniem równań ważnym dla przepływów w wąskich kanałach. Dokonano porównań wyników otrzymanych na drodze rozwiązania analitycznego i numerycznego dla przypadku nieprzewodzących ciepła ścianek kanału.

1. WSTĘP

Przepływy roztworów elektrolitów w wąskich szczelinach międzyelektrodowych mają duże znaczenie praktyczne w procesie elektrochemicznej obróbki materiałów. Przepływy te są tematem prac teoretycznych i doświadczalnych [2, 3, 5, 6, 8, 9]. Duże gęstości prądów w szczelinie są powodem silnego nagrzewania się roztworu, co z kolei w decydujący sposób wpływa na dynamikę przepływów [2, 5, 8]. Rozkład temperatury oddziałuje pośrednio i bezpośrednio na roztwarzanie materiału anody. Tak więc, określenie profilów temperatury w szczelinie międzyelektrodowej jest zagadnieniem ważnym.

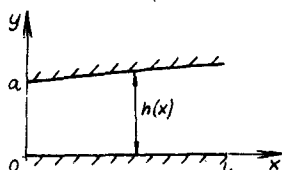
W niniejszej pracy dokonano analizy rozkładu temperatury w wąskim kanale o zmiennej szerokości, wyznaczonym przez dwie elektrody. Zagadnienie rozwiązano analitycznie i porównano z wynikami uzyskanymi przez autora na drodze analizy numerycznej.

2. SFORMUŁOWANIE MODELU PRZEPIŁYWU

Rozważamy przepływ elektrolitu w kanale pokazanym na rys.1 przy założeniach:

- przepływ jest płaski, laminarny,
- przepływ jest quasi-stacjonarny,
- płyn jest jednofazowy,
- niezotermiczność przepływu nie wpływa na własności elektrolitu,
- szerokość kanału h zmienia się wolno wzdłuż kierunku przepływu,

- ścianki kanału /elektrody/ nie przewodzą ciepła,
- nie uwzględnia się wymiany masy w przepływie,
- w równaniach Naviera-Stokesa pominięto, jako tutaj mało istotne, składowe siły grawitacji,
- indukowane pole magnetyczne jest na tyle słabe, że nie wpływa na obraz przepływu.



Rys. 1

Równania pędu, ciągłości oraz energii opisujące przepływ w kartezjańskim układzie współrzędnych /oś x związana z płaską katodą/ są

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{j^2}{\sigma} \quad (4)$$

W powyższych równaniach u i v są składowymi prędkościami w kierunkach osi x i y ; ρ , μ , λ , c_p , σ są odpowiednio gęstością, współczynnikiem lepkości dynamicznej, współczynnikiem przewodzenia ciepła, ciepłem właściwym przy stałym ciśnieniu i współczynnikiem przewodności właściwej elektrolitu, T jest temperaturą, j gęstością prądu. Uzupełnieniem układu (1-4) są następujące warunki brzegowe

$$\text{dla } y = 0 \quad u = v = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

$$\text{dla } y = h \quad u = v = \frac{\partial T}{\partial n} = 0$$

gdzie:

n - kierunek normalny do elektrody

$$\text{dla } x = 0 \quad T = T_0, \quad p = p_0$$

$$\text{dla } x = L \quad p = p_L$$

gdzie:

T_0 - temperatura elektrolitu na wlocie

p_0 - ciśnienie elektrolitu na wlocie

p_L - ciśnienie elektrolitu na długości L kanału

Dla wygody dalszego postępowania wprowadzono zmienne bezwymiarowe związane z objaśnionymi już wielkościami w sposób następujący

$$u = v_0 \bar{u}, \quad v = \frac{\lambda}{\rho c_p a} \bar{v}, \quad p = \frac{\lambda}{\rho c_p \mu v_0^2} \bar{p} = \frac{\bar{p}}{C_2}$$

$$x = \frac{\rho c_p v_0 a^2}{\lambda} \bar{x} = \frac{\bar{x}}{C_1}, \quad y = a \bar{y}, \quad h = a \bar{h} \quad (5)$$

$$T = \frac{\sigma \Phi_a}{\lambda} \bar{T} + T_0$$

Tutaj a jest szerokością szczeliny na wlocie, v_0 - prędkością średnią elektrolitu mierzoną również na wlocie do kanału, Φ_a jest potencjałem anody /potencjał katody $\Phi_k = 0$.

Użycie zmiennych bezwymiarowych (5) w (1-4), po uproszczeniach równań wynikających z oszacowania ich poszczególnych składników [2, 3, 6] oraz opuszczeniu oznaczeń bezwymiarowości zmiennych, prowadzi do układu równań

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{1}{h^2} \quad (9)$$

i następujących warunków brzegowych

$$\text{dla } y = 0 \quad u = v = \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

$$\text{dla } y = h \quad u = v = \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (11)$$

$$\text{dla } x = 0 \quad T = 0, \quad p = C_2 p_0 = p_{0K} \quad (12)$$

$$\text{dla } x = C_1, \quad L = L_K \quad p = C_2 p_L = p_{LK} \quad (13)$$

3. CAŁKI RÓWNAŃ

W myśl poczynionych założeń, równania (6-8) można rozwiązać niezależnie od (9). Całkując (6) dwukrotnie po y z wykorzystaniem (10) i (11) otrzymano

$$u = \frac{1}{2} \frac{dp}{dx} y (y-h) \quad (14)$$

Zależność powyższą podstawiono do równania ciągłości (8) po uprzednim jego scałkowaniu w poprzek kanału. Pozwoliło to po prostych zabiegach, z uwzględnieniem warunków (12) i (13), na otrzymanie wyrażenia na ciśnienie w przepływającym elektrolicie

$$p = p_{0\pi} - (p_{0\pi} - p_{L\pi}) \left[\int_0^{L\pi} \frac{dx}{h^3(x)} \right]^{-1} \quad (15)$$

Podstawienie (15) do (14) daje

$$u = \frac{p_{L\pi} - p_{0\pi}}{2} \left[\int_0^{L\pi} \frac{dx}{h^3(x)} \right]^{-1} \frac{y}{h^2} \left(\frac{y}{h} - 1 \right) \quad (16)$$

a użycie (16) w (8)

$$v = \frac{p_{L\pi} - p_{0\pi}}{2} \left[\int_0^{L\pi} \frac{dx}{h^3(x)} \right]^{-1} \frac{h' y^2}{h^3} \left(\frac{y}{h} - 1 \right) \quad (17)$$

Dla wygody dalszych rozważań wprowadzono stałą

$$\alpha = \frac{p_{L\pi} - p_{0\pi}}{2} \left[\int_0^{L\pi} \frac{dx}{h^3(x)} \right]^{-1}$$

Podstawiając otrzymane zależności na u i v do równania (9) oraz dokonując transformacji zmiennych niezależnych

$$\eta = x, \quad \xi = \frac{y}{h(x)} \quad (18)$$

otrzymano następującą postać równania energii

$$\alpha h(\eta) \xi (\xi - 1) \frac{\partial T}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2} + 1 \quad (19)$$

z warunkami brzegowymi

$$\text{dla } \eta = 0 \quad T = 0 \quad (20)$$

$$\text{dla } \xi = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial \xi} = 0 \quad (21)$$

$$\text{dla } \xi = 1 \quad \frac{\partial T}{\partial \xi} = \frac{h h'}{1 + (h')^2} \frac{\partial T}{\partial \eta} \quad (22)$$

Ponieważ szczeliny międzyelektrodowe w większości przypadków należą do "długich" kanałów $\frac{a}{l} \ll 1$, do rozwiązania równania (19) wykorzystano metodę podaną w [1]. Przyjęto całkę

$$T = v(\eta) + \theta(\xi) \quad (23)$$

która /niestety/ w założonej postaci nie może spełniać warunku brzegowego (20) nakładanego na temperaturę. Zamiast niego użyto warunku

$$\int_0^{\eta} \frac{d\eta'}{h(\eta')} = \int_0^1 u h(\eta) T(\eta, \xi) d\xi \quad (24)$$

równoznacznego z założeniem, że ciepło Joule'a wydzielane w kanale w jednostce czasu równe jest ilości ciepła przenieszonego w tym samym czasie przez strumień elektrolitu w przekroju szczeliny o współrzędnej η . Dodatkowo, na mocy założenia dotyczącego zmian szerokości kanału przyjęto

$$\text{dla } \xi = 1 \quad \frac{\partial T}{\partial \xi} \approx 0 \quad (25)$$

Podstawiając (16) i (23) do (24) przy uwzględnieniu (18), otrzymano:

$$\int_0^{\eta} \frac{d\eta'}{h(\eta')} = \alpha \int_0^1 \xi(\xi-1) [v(\eta) + \theta(\xi)] d\xi \quad (26)$$

Użycie założonej całki (23) w równaniu (19) przy wykorzystaniu (21), (25) i (26) pozwoliło na otrzymanie prostej funkcji rozkładu temperatury w szczelinie w postaci

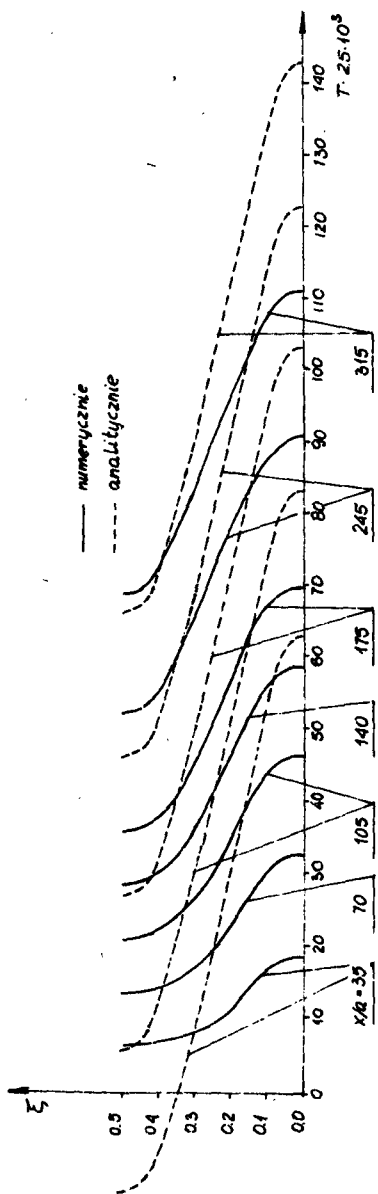
$$T = -\frac{6}{\alpha} \int_0^{\eta} \frac{d\eta'}{h(\eta')} + \xi^3 - \frac{\xi^2}{2} (\xi^2 + 1) + \frac{3}{140}$$

lub z uwzględnieniem, że wydatek płynu w przekroju szczeliny jest stały $\alpha = -6/$

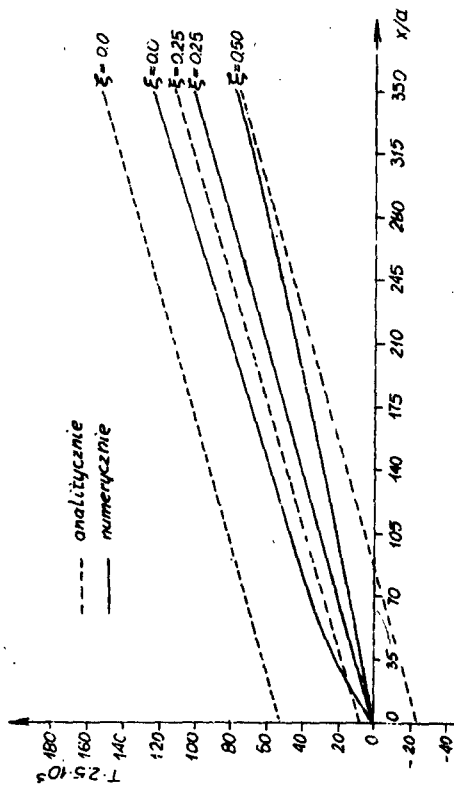
$$T = \int_0^{\eta} \frac{d\eta'}{h(\eta')} + \xi^3 - \frac{\xi^2}{2} (\xi^2 + 1) + \frac{3}{140} \quad (27)$$

4. DYSKUSJA WYNIKÓW

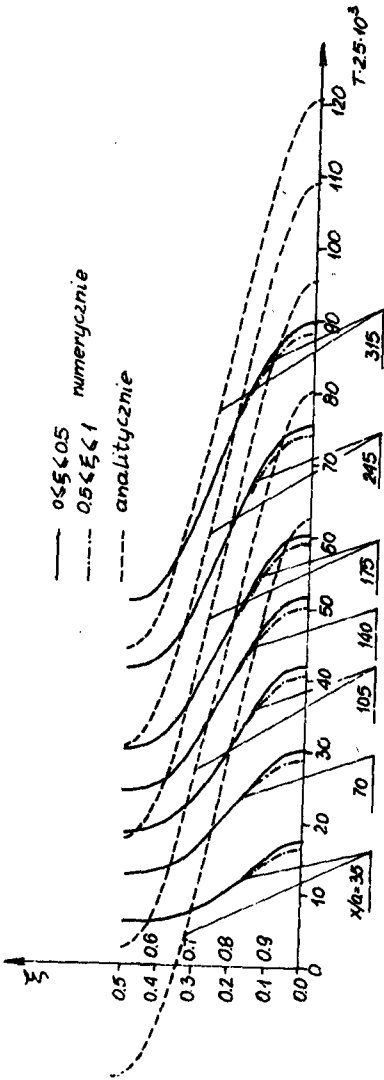
Poniższe wyniki przedstawiono dla typowych warunków przepływu w szczelinie międzyelektrodowej w czasie obróbki elektrochemicznej. Użyto dwumolowego roztworu NaCl o parametrach: $c_p = 3,6 \cdot 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\lambda = 0,6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\mu = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ N s m}^{-2}$, $\delta = 15 \text{ S m}^{-1}$, $\rho = 10^3 \text{ kg m}^{-3}$. Przyjęto ponadto, że: $\Phi_a = 10 \text{ V}$, $v_0 = 3 \text{ m s}^{-1}$, $T_0 = 293 \text{ K}$. Dla łatwiejszego odczytu wykresów wprowadzono wygodniejszą dla Czytelnika bezwymiarową współrzędną w kierunku przepływu elektrolitu $-\frac{x}{a}$.



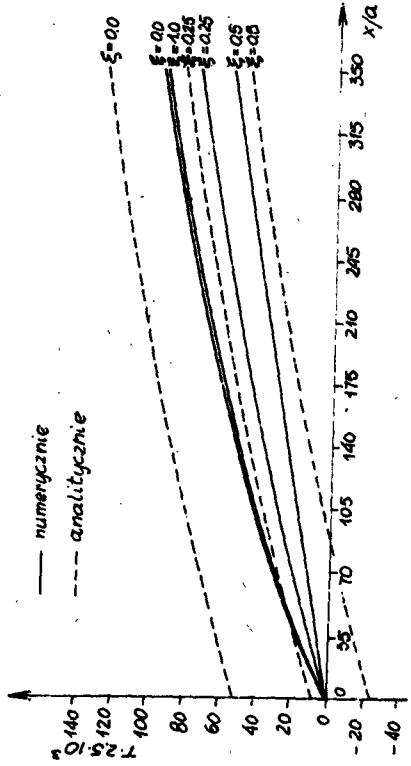
Rys. 2



Rys. 3



Rys.4



Rys.5

Rysunki 2 i 3 pokazują rozkład temperatury w kanale w przypadku równoległości jego ścianek $/h = a = 1/$. Ze względu na przyjęty warunek (25) odpowiadają one rozkładom w pełni rozwiniętym. Widoczny jest duży gradient temperatury w pobliżu elektrod i osi kanału. Spowodowane jest to przyjęciem warunków (21) i (25) dla temperatury oraz (10) i (11) dla prędkości w obecności silnego nagrzewania elektrolitu w całej jego masie. Rozkład temperatury wzdłuż kanału jest liniowy.

Na tle rozwiązań analitycznych naniesiono odpowiednie wykresy otrzymane przez autora na drodze rozwiązania numerycznego równania (19). Użyto schematu różnicowego zaproponowanego w (7) do rozwiązywania przepływów w warstwie przysciennej. Duża ilość węzłów siatki różnicowej w poprzek szczeliny z jednoczesnym zmniejszaniem wymiarów siatki w pobliżu wlotu kanału, jego osi i ścianek, gwarantowała wysoką dokładność wyników.

Zastosowanie na wlocie do szczeliny warunku granicznego (20) dało profile temperatur typowe dla początkowych długości kanałów. Nieustabilizowane profile występują w całym badanym zakresie długości szczeliny $/\frac{L}{h} \leq 350/$.

Rysunki 4 i 5 ilustrują analogiczne jak omówione poprzednio rozkłady, ale w kanale o zmiennej szerokości. Kształt anody opisuje tutaj liniowa funkcja:

$$h = 1 + 18,42\eta$$

odpowiadająca w przybliżeniu szerokości szczeliny po 12 s od stamu równoległości ścianek w przypadku roztwarzania anody w elektrolicie, w którym $\delta = \delta(T) [9]$. Linia przerywaną na rysunku 4 /dla rozwiązania numerycznego/ oznaczono temperaturę w pobliżu anody $/\xi = 1/$. Różnica rozkładów przy katodzie i anodzie wynika z zastosowania warunku brzegowego (22), a nie jego przybliżenia. Wielkość wspomnianej wyżej różnicy pozwala ocenić słuszność wprowadzenia przybliżenia (25) do rozwiązania analitycznego.

5. WNIOSKI

- a. Przybliżone rozwiązanie (27) równania (19) ma ograniczone zastosowanie. Jest ono słuszne dla w pełni rozwiniętego rozkładu temperatur w kanale.
- b. Z uwagi na występujące w praktyce długości szczelin międzyelektrodowych, rozwiązanie (27) mało dokładnie opisuje temperaturę w elektrolicie, gdyż faktycznie rozkład temperatury jest nieustabilizowany.
- c. Zależność (27) służyć może /rys.3 i 5/ do dokładnego wyznaczania gradientów temperatury wzdłuż szczeliny, co istotne jest np. do określania miejsca, w którym rozpocząć się może wrzenie elektrolitu.
- d. W świetle powyższego, wyniki pracy (2) dotyczące parametrów przepływu w szczelinie o ściankach równoległych mają niewielką wartość praktyczną.

6. LITERATURA

- [1] Berg R., Stuart V., Litfut E.: Javlenia perenosa. *Chimia*, Moskva 1974
- [2] Engelgardt G.R., Kryšov V.S.: Dinamika niezotermičeskogo tečenia pri anodnom rastvorenii metalov. *Elektr. Obr. Mat.*, 4, 1978
- [3] Engelgardt G.R., Kryšov V.S.: Raččet gidrodinamičeskogo i koncentracionnogo polej v kanale s rastvorjaščej stienkoj. *Elektr. Obr. Mat.*, 6, 1980
- [4] Han T., Humphrey J.A.C., Launder B.E.: A Comparison of Hybrid and Quadratic - Upstream Differencing in High Reynolds Number Elliptic Flows. *Comp. Math. in Appl. Mech. and Engn.*, 29, 1981
- [5] Kozak J.: Kształtowanie powierzchni obróbką elektrochemiczną bezstykową. *Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika* 41, Warszawa 1976
- [6] Kryšov V.S., Engelgardt G.R., Petrov J.N.: Elektrochimičeskije rastvorenije stienki kanała v laminarnom potokie rastvora elektrolita. *Elektr. Obr. Mat.*, 1, 1978
- [7] Patankar S.V., Spalding D.B.: *Heat and Mass Transfer in Boundary Layers*. Intertext Books, London 1970
- [8] Ruszaj A.: Wpływ parametrów hydrodynamicznych na proces elektrochemicznej obróbki bezstykowej. *Praca doktorska*, Kraków 1977
- [9] Topoliński A.: Laminarny przepływ elektrolitu w kanale z roztwarzaną ścianką. W przygotowaniu

TEMPERATURE DISTRIBUTION IN LAMINAR FLOW
OF ELECTROLYTE IN INTERELECTRODE GAP

Summary

The steady flow of a viscous, incompressible, electrically conducting fluid between the electrodes having slowly changed width is considered. For a description of the problem, the continuity, momentum, energy equations are used. The flow is modelled by the slender channel approximation to Navier-Stokes and energy equations. The results of an analytical and numerical solutions of the energy equations for the flow in a channel with adiabatic walls are compared.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЛАМИНАРНОМ ТЕЧЕНИИ ЭЛЕКТРОЛИТА В МЕЖЭЛЕКТРОДНОМ ЗАЗОРЕ

Резюме

В работе рассматривается стационарное течение вязкой, несжимаемой и электропроводящей жидкости между непараллельными электродными пластинами. Для описания проблемы использованы уравнения неразрывности, переноса количества движения и тепла. Принято приближение уравнений важных для течений в узких каналах. Сравнены результаты полученных аналитических и численных расчетов в случае теплоизолированных стенок канала.

Krzysztof Wernerowski

TLUMIENIE DYNAMICZNO-WISKOTYCZNE DRGAŃ POPRZECZNYCH MASZYN

Stwierdzono, że tylko wielokrotny układ zapewnia realne tłumienie dynamiczno-wiskotyczne drgań poprzecznych maszyn. Opracowano tłumik z wielokrotnym tłumieniem dynamicznym z cieczą wiskotyczną. Uzyskano realne tłumienie drgań w szerszym zakresie częstości.

1. WSTĘP

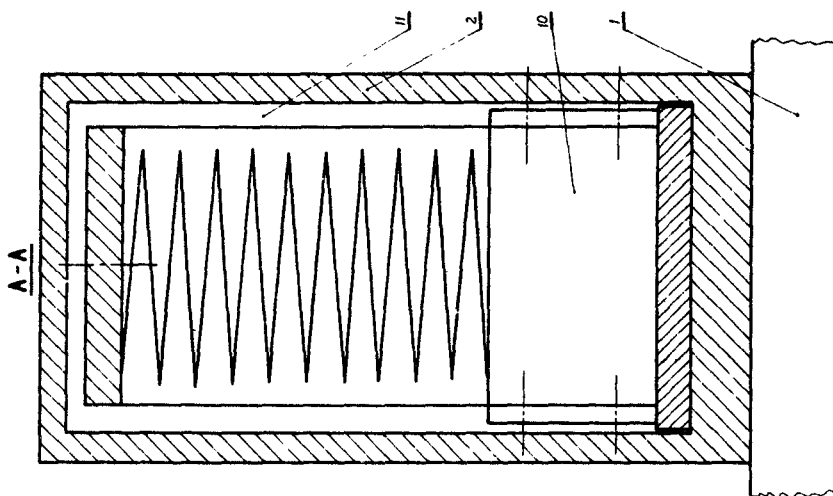
Realne tłumienie drgań mechanicznych jest złożone oraz nie zawsze możliwe. Wykonano prace teoretyczne i doświadczalne w zakresie tłumienia dynamiczno-wiskotycznego drgań poprzecznych maszyny.

Stwierdzono, że tylko wielokrotny układ jest skuteczny dla rzeczywistych wibracji o złożonym, zmiennym i stochastycznym widmie [1, 3, 5].

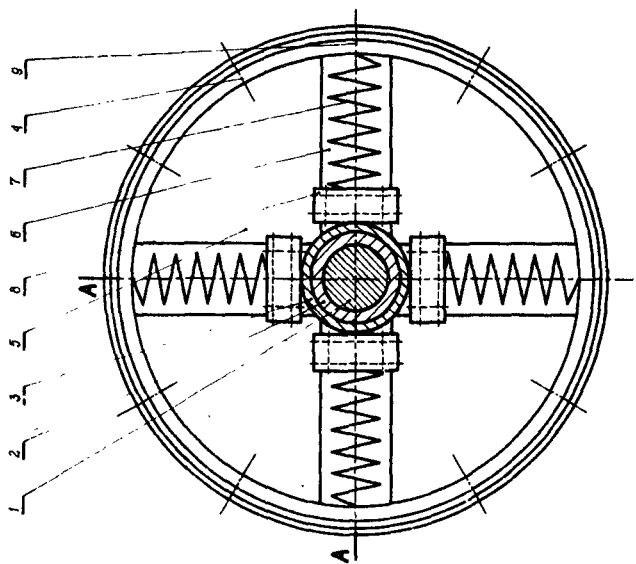
Zastosowanie wyraźnego tłumienia wiskotycznego [4] w pewnym stopniu zmniejszyło maksimum eliminowania drgań dla częstości podstawowej, lecz równocześnie uzyskano skuteczność rozpraszania szkodliwej energii drgań dla szerokiego pasma częstotliwości.

2. TLUMIK DYNAMICZNO-WISKOTYCZNY DRGAŃ POPRZECZNYCH MASZYN

Istota działania polega na wielokrotnym tłumieniu dynamicznym w przestrzeni wypełnionej cieczą wiskotyczną o właściwym współczynniku lepkości. Na rys.1 przedstawiono widok tłumika dynamiczno-wiskotycznego. Na wale /1/ umieszczona jest obudowa /2/ z pasowaną luźno piastą /3/ i umocowanymi wy-cinkami /5/, które tworzą dowolną ilość symetrycznie rozmieszczonych wy-cięć /6/ zamkniętych pierścieniem /4/ przy pomocy połączeń spoczynkowych /9/ i /rys.2/ mas /10/ prowadzonych w częściach /5/ przy pomocy płytek /8/ i zamocowanych na sprężynach /7/. Cała przestrzeń wewnętrzna tłumika drgań poprzecznych jest wypełniona cieczą wiskotyczną /11/ o właściwym współ-czynniku lepkości. Podczas ruchu obrotowego normalna siła bezwładności po-woduje określone odsunięcie płytek /8/ i mas /10/ od osi obrotu i ściska-nia sprężyn /7/. Drgania poprzeczne są przejmowane przez masy drgające na sprężynach /7/. Równocześnie wibracje pozostałych części układu zmniejsza-



Rys. 2. Półprzekrój A - A tłumika dynamiczno-wiskotycznego



Rys. 1. Widok tłumika dynamiczno-wiskotycznego

ją się. Energia szkodliwych drgań jest skutecznie rozpraszana przez tarcie wiskotyczne w cieczy /11/ i stopniowo drgania wewnętrzne zanikają.

3. OBLICZENIA I BADANIA

Analizę tłumika dynamiczno-wiskotycznego przedstawiono na podstawie równań Lagrange'a drugiego rodzaju [3, 4]. Podczas obliczeń uwzględniono symetrię tłumika dynamiczno-wiskotycznego drgań poprzecznych.

Zbudowano model tłumika przedstawionego na rys.1, który zamocowano na wale.

Badania zrealizowano na tokarce w laboratorium. Wymuszenie drgań uzyskano stosując bezwładnik mimośrodowy.

Podczas badań zastosowano miernik drgań SM-211 typu 11 000 produkcji Zakładów Elektroniki Pomiarowej „OTTO SCHÖN” Drezno, NRD. Miernik składa się ze wzmacniacza całkującego SM-10 typu 11013, części odczytowej SM-40 typu 11025, zasilacza SM-60 typu 11030, podzespołu przetwarzającego EG-201 typu 11008. Równocześnie zastosowano piezoelektryczny czujnik dla przyspieszeń KD-35a produkcji VEB Metra Radebeul, NRD.

Podstawowe dane:

- częstotliwości	2 Hz + 10 kHz
- przyspieszenia	0,032 + 320 m/s ²
- prędkości	0,00032 + 3,2 m/s
- amplitudy	0,0032 + 100 mm

Granice błędów:

- dla częstotliwości występujących podczas badań 2 kHz: ±	od 1 do 5 %
- dla przyspieszeń około	$5 \cdot 10^{-3}$ m/s ²
- dla prędkości około	$2 \cdot 10^{-5}$ do $4 \cdot 10^{-4}$ m/s
- dla amplitud około	$2 \cdot 10^{-4}$ do 0,25 mm

Najpierw zrealizowano pomiary rzeczywistych drgań młynów młotkowych typu M1-5d, OMT-2.

Zakresy wartości parametrów drgań:

- częstotliwość	49 Hz
- przyspieszenia	6 + 100 m/s ²

Kontrolne pomiary prędkości oraz amplitud potwierdziły harmoniczny typ drgań.

Oczywiście wykonano również analizę statystyczną wyników pomiarów. Na elektronicznej maszynie cyfrowej obliczono arytmetycznie: wariancje, odchylenia standardowe całości oraz średniej, przedziały ufności, uwzględniając poziom istotności $\alpha = 0,1$ i wartość krytyczną zmiennej $t = 1,7613$.

Największe wartości wystąpiły dla młyna OMF-2:

- średnia arytmetyczna	97.666666627
- wariancja	35.238095164
- odchylenie standardowe	5.9361683130
- odchylenie standardowe średniej	0.3957445611
- przedział ufności $\bar{X} - T.SX$	87.2112935781
$\bar{X} + T.SX$	108.1220396757

Przeciętny względny błąd procentowy wynosił $\sim 2\%$.

Modelowe drgania tłumika dynamiczno-wiskotycznego wymuszano stosując parametry uzyskane podczas badań rzeczywistych wibracji młynów młotkowych. Zastosowano też analogiczne opracowanie statystyczne.

Podczas analizy uwzględniono symetrię tłumika dynamiczno-wiskotycznego drgań poprzecznych.

Wyniki obliczeń teoretycznych [2, 3, 4] przedstawiono w postaci ogólnego wzoru

$$q_1 = \sum_{k=1}^1 c_1^{(k)} e^{i\omega kt} \quad (1)$$

gdzie:

c_1^k - liczby zespolone

Badania modelowe tłumika dynamiczno-wiskotycznego drgań poprzecznych potwierdziły możliwości skutecznego działania w szerszym zakresie częstotliwości. Uzyskano pozytywne wyniki dla pasma

$$0,81 f_{n1} \leq f_n \leq 1,16 f_{n1} \quad (2)$$

gdzie:

f_{n1} - częstotliwość drgań własnych

f_n - częstotliwość drgań tłumionych

3. WNIOSKI

- Rzeczywista skuteczność wielokrotnego tłumika dynamiczno-wiskotycznego jest większa od rozwiązań [4] z pojedynczą masą na więzi sprężystej.
- Zastosowanie tłumików dynamiczno-wiskotycznych zmniejsza zużycie zmęczenia maszyn.
- Z badań modelowych wynika możliwość realnego obniżenia parametrów drgań dla szerszego pasma częstotliwości.

4. LITERATURA

- [1] Bartkiewicz J.: Badania tłumików drgań. Prace IPBM Politechniki Warszawskiej, nr 7, Warszawa 1974

- [2] Crede C.E.: Vibration and Shock Isolation. Wiley, New York 1951
- [3] Osifski Z.: Teoria drgań. PWN, Warszawa 1978
- [4] Osifski Z.: Tłumienie drgań mechanicznych. PWN, Warszawa 1979
- [5] Skalmierski B., Tylikowski A.: Procesy stochastyczne w dynamice. PWN, Warszawa 1972

DYNAMIC-VISCOSE DAMPING OF TRANSVERSE MACHINE VIBRATIONS

Summary

It has been ascertained that only a multiple system ensures real dynamic-viscose damping of transverse machine vibrations. A damper with multiple dynamic damping and viscous fluid was built. Real vibration damping in a wider frequency range was reached.

ДИНАМИЧЕСКО - ВЯЗКОЕ ДЕМПФИРОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ ВИБРАЦИЙ МАШИН

Резюме

Установлено, что только многократные системы дают настоящее гашение динамическо-вязких поперечных вибраций машин. Построен демпфер с многократным динамическим демпфированием с вязкой жидкостью. Получено реальное гашение вибраций в более широком диапазоне частот.

**Biblioteka Główna ATR
w Bydgoszczy**

Cz	1006
	28 1985