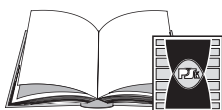


podręcznik akademicki

Włodzimierz A. Marcinkowski
Czesław Kundera

TEORIA KONSTRUKCJI USZCZELNIEŃ BEZSTYKOWYCH



WYDAWNICTWO
POLITECHNIKI ŚWIĘTOKRZYSKIEJ
W KIELCACH

Kielce 2008

PODRĘCZNIK AKADEMICKI

Redaktor Naukowy serii

NAUKI TECHNICZNE: BUDOWA I EKSPLOATACJA MASZYN

prof. dr hab. inż. Stanisław Adamczak dr h.c.

Recenzenci:

prof.dr hab. inż. Waldemar JĘDRAL

dr hab. inż. Andrzej KORCZAK

Autorzy:

prof.dr hab. inż. Włodzimierz A. MARCINKOWSKI – rozdziały 1, 2, 3, 6, 7, 8

dr hab. inż. Czesław KUNDERA – rozdziały 4, 5 i redakcja całości

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część tej pracy nie może być powielana czy rozpowszechniana w jakiegokolwiek formie, w jakikolwiek sposób: elektroniczny bądź mechaniczny, włącznie z fotokopiowaniem, nagrywaniem na taśmę lub przy użyciu innych systemów, bez pisemnej zgody wydawcy.

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2008

PL ISBN 978-83-88906-37-4



25-314 Kielce, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, tel. (0-41) 34 24 581

www.tu.kielce.pl/wydawnictwo

Przedmowa

Uszczelnienia spełniają bardzo ważne funkcje w budowie oraz eksploatacji maszyn i urządzeń. Tradycyjnie chronią one środowisko przed wyciekami substancji szkodliwych z maszyn oraz zabezpieczają wnętrza maszyn przed oddziaływaniem zanieczyszczeń z otoczenia. W przypadku maszyn wirnikowych wpływają również na stan dynamiczny zespołu wirującego.

Teoria uszczelnień oraz ich konstrukcja i techniki uszczelniania stanowią obecnie w pełni ukształtowaną i dynamicznie rozwijającą się specjalność (dyscyplinę) naukową. Jej rozwój jest wymuszony przez nowe technologie głównie w przemyśle chemicznym, a szczególnie energetyce, w których procesy przebiegają przy coraz wyższym ciśnieniu i temperaturze czynnika roboczego. Rozwój ten jest również stymulowany przez prawodawstwo, które w trosce o stan środowiska wymusza wysoki poziom szczelności i trwałości węzłów uszczelniających. O coraz większym znaczeniu techniki i teorii uszczelniania świadczą organizowane cyklicznie międzynarodowe konferencje naukowe oraz liczne publikacje naukowe w uznanych czasopismach.

Przedkładany uwadze czytelnikom, podręcznik jest poświęcony głównie ruchowym uszczelnieniom szczelinowym, które zajmują szczególne miejsce wśród bezstykowych uszczelnień zespołów wirujących (wałów, wirników). Osobliwość tych uszczelnień polega na tym, że jednocześnie mogą one spełniać funkcję uszczelnienia oraz podpór hydrodynamicznych. Wynika z tego szeroki zakres problemów związanych z ich obliczeniami i projektowaniem. Jeżeli przyjmiemy funkcję uszczelnienia jako dominującą, wówczas charakterystycznym wskaźnikiem będzie wartość przecieku. W przypadku uszczelnienia spełniającego rolę również podpory hydrodynamicznej, przeciek jest istotny, ale często o wiele ważniejsze znaczenie mają własności sprężysto – tłumiące, które wpływają na stan dynamiczny całego zespołu wirującego. Z kolei, charakterystyki dynamiczne zależą od warunków brzegowych oraz prędkości ścianek tworzących szczelinę, przy czym jedną ze ścianek stanowi wirujący wał lub wirnik. W ten sposób, uszczelnienia i wirnik (lub zespół wirujący) stanowią jeden zamknięty układ hydromechaniczny.

Związek charakterystyk dynamicznych wirnika z konstrukcją bezstykowych uszczelnień wzdłużnych po raz pierwszy był wykazany i badany przez A.A. Łomakina. W swoich pracach naukowych wyjaśnił on powstawanie promieniowej hydrostatycznej siły centrującej we wzdłużnym uszczelnieniu pierścieniowym i wyprowadził wzory do jej obliczenia. Tak zwany efekt Łomakina wszedł na trwałe do światowej literatury z zakresu dynamiki zespołów wirujących pomp i kompresorów. Problemy te są, między innymi, dokładnie opisane w niniejszym podręczniku.

Celem książki jest zapoznanie potencjalnych czytelników, tj. studentów, pracowników nauki, konstruktorów i eksploataatorów maszyn wirnikowych z proble-

mami teorii i praktyki uszczelnień szczelinowych – najbardziej rozpowszechnionych uszczelnień bezstykowych.

Książka jest przeznaczona, przede wszystkim, dla studentów specjalności dynamika i wytrzymałość maszyn przepływowych, ale również może być przydatna dla studentów innych specjalności budowy maszyn, a także specjalistów z zakresu maszyn wirnikowych, chcących zapoznać się z problemami hydrodynamiki przepływów w szczelinach dławiących.

Autorzy bardzo gorąco dziękują Recenzentom pracy: dr hab. inż. Andrzejowi Korczakowi z Politechniki Śląskiej, a zwłaszcza prof. dr hab. inż. Waldemarowi Jędralowi z Politechniki Warszawskiej za wnikliwe przestudiowanie pracy oraz wiele bardzo cennych uwag merytorycznych i uzupełnień, które przyczyniły się niewątpliwie do poprawienia i wyeliminowania licznych błędów, jakie zawierał wstępny tekst pracy.

Kielce, maj 2008.

Spis treści

Spis ważniejszych oznaczeń.....	11
Wprowadzenie.....	19
1. HYDRODYNAMIKA PRZEPIYWÓW USTALONYCH PRZEZ KANAŁY PROSTE	
1.1. Wstępne określenia.....	25
1.2. Przepływ ustalony przez prostoosiową rurę o niewielkiej średnicy...	28
1.2.1. Schemat obliczeniowy i równanie ruchu.....	28
1.2.2. Rozkład ciśnienia i naprężeń stycznych.....	30
1.2.3. Obliczenie rozkładu prędkości oraz wydatku.....	33
1.2.4. Współczynnik oporów tarcia.....	35
1.2.5. Przybliżona ocena wpływu stożkowatości.....	38
1.2.6. Początkowy odcinek kanału.....	47
1.2.7. Przepływ turbulentny.....	49
1.2.8. Szeregowe i równoległe połączenia kanałów.....	57
1.3. Przepływ ustalony Poiseuille'a w kanale płaskim.....	61
1.3.1. Przedstawienie problemu.....	61
1.3.2. Wyprowadzenie równania ruchu.....	62
1.3.3. Wydatek i zmiana prędkości w szczelinie.....	64
1.3.4. Naprężenia styczne.....	68
1.3.5. Obliczenie siły naporu na ścianki z uwzględnieniem siły bezwładności.....	70
1.3.6. Uwzględnienie oporów miejscowych.....	78
1.3.7. Przejście do wzdłużnych kanałów pierścieniowych.....	83
1.4. Przepływ ustalony Poiseuille'a - Couette'a w kanale płaskim.....	87
1.4.1. Uwagi wstępne.....	87
1.4.2. Schemat obliczeniowy i równania ruchu.....	87
1.4.3. Obliczenie prędkości i wydatku.....	89
1.4.4. Rozkład ciśnienia w szczelinie.....	93
1.4.5. Profile prędkości i zmiany ciśnienia dla różnych warunków brzegowych.....	96

1.4.6.	Obliczenie sił i momentów działających na ścianki kanału.....	104
1.4.7.	Siły tarcia.....	106
1.4.8.	Współczynniki tarcia.....	111
2.	CHARAKTERYSTYKI HYDRODYNAMICZNE KANAŁU PŁASKIEGO Z PODATNIE ZAMOCOWANĄ ŚCIANKĄ	
2.1.	Osobliwości przepływów niestacjonarnych i sformułowanie zadania.....	115
2.2.	Wyprowadzenie równań ruchu.....	118
2.2.1.	Równanie przepływu niestacjonarnego.....	118
2.2.2.	Przykład oceny rzędu składników równania ruchu.....	120
2.2.3.	Opis geometrii szczeliny.....	122
2.2.4.	Warunki brzegowe.....	124
2.2.5.	Równanie ciągłości.....	124
2.3.	Rozkład ciśnienia i obliczenie składowych wydatku.....	127
2.3.1.	Równanie Reynoldsa dla płaskiego kanału.....	127
2.3.2.	Całkowanie równania Reynoldsa.....	128
2.3.3.	Podział wydatku na oddzielne składniki.....	130
2.3.4.	Wydatek przepływu ciśnieniowego.....	132
2.3.5.	Wydatek strumienia wyciskania.....	133
2.3.6.	Wydatek inercyjny.....	135
2.4.	Obliczenie sił i momentów.....	137
2.4.1.	Przepływ ciśnieniowy.....	137
2.4.2.	Przepływ wyciskania.....	138
2.4.3.	Strumień inercyjny.....	141
2.4.4.	Ocena wartości sił i momentów.....	142
2.4.5.	Wybrane wnioski.....	143
3.	WPŁYW STRUMIENIA NA CHARAKTERYSTYKI DYNAMICZNE SPRĘŻYŚCIE ZAMOCOWANEJ ŚCIANKI KANAŁU PŁASKIEGO	
3.1.	Wyprowadzenie równań drgań.....	145
3.2.	Częstości własne i postacie drgań własnych sprężycie zamocowanej płytki w powietrzu.....	148
3.3.	Równania drgań wymuszonych z uwzględnieniem sił i momentów hydrodynamicznych.....	152

3.4.	Równania drgań ścianek z jednym stopniem swobody.....	154
3.5.	Wpływ strumienia na częstości własne drgań ścianki kanału.....	156
3.6.	Funkcje przejścia. Charakterystyki amplitudowe i fazowe.....	158
3.7.	Warunki stabilności dynamicznej.....	164
3.8.	Dywergencja ścianki kanału.....	169
3.9.	Warunki pojawienia się flutteru.....	170
3.10.	Stabilność systemów z jednym stopniem swobody.....	175
3.11.	Uwagi ogólne.....	178
4.	PRZEPŁYW OSIOWO-SYMETRYCZNY PRZEZ SZCZELINĘ POPZECZNĄ	
4.1.	Model przepływu.....	181
4.2.	Model bezстыkowego uszczelnienia czołowego.....	185
4.2.1.	Schematy podstawowych odmian konstrukcyjnych.....	185
4.2.2.	Model kinematyczny uszczelnienia czołowego odmiany FMRR.....	188
4.3.	Rozkład ciśnienia w szczelinie.....	191
4.3.1.	Rozwiązanie numeryczne.....	191
4.3.2.	Rozwiązania analityczne.....	198
5.	DYNAMIKA BEZSTYKOWEGO USZCZELNIENIA CZOŁOWEGO	
5.1.	Równania ruchu.....	205
5.2.	Wyznaczenie sił i momentów.....	211
5.2.1.	Składnik hydrostatyczny.....	212
5.2.2.	Składnik hydrodynamiczny.....	216
5.2.3.	Zależności końcowe.....	219
5.3.	Drgania kątowe pierścienia.....	221
5.4.	Badanie stabilności.....	229
5.5.	Drgania osiowe pierścienia.....	232
6.	RÓWNANIA RUCHU CIECZY W PIERŚCIENIOWEJ SZCZELINIE WZDŁUŻNEJ	
6.1.	Ogólna charakterystyka zadania.....	241
6.2.	Równania Naviera-Stokesa i przekształcenia Reynoldsa.....	244
6.3.	Ocena rzędu składników równania Reynoldsa.....	247
6.4.	O wyborze współrzędnych układu.....	256
6.5.	Zmiana geometrii szczeliny i warunki graniczne.....	260

6.5.1.	Określenie lokalnej wysokości szczeliny.....	261
6.5.2.	Graniczne prędkości i przyspieszenia.....	267
6.5.3.	Ciśnienie i prędkości na brzegach kanału.....	277
6.6.	Równanie Reynoldsa dla rozkładu ciśnienia.....	279
6.6.1.	Wyrażenie sił tarcia przez ciśnienie dynamiczne.....	279
6.6.2.	Siły bezwładności i uśrednione równanie ciągłości.....	281
6.6.3.	Wyprowadzenie równania podstawowego.....	283
6.7.	Rozwiązanie równania Reynoldsa.....	288
6.8.	Obliczenie wydatków.....	291
6.8.1.	Ogólne wyrażenie składowych wydatku.....	291
6.8.2.	Obliczenie całek s_{mn}	294
6.8.3.	Wydatek przepływu ciśnieniowego.....	295
6.8.4.	Wydatek strumienia wyciskania.....	297
6.8.5.	Składowa inercyjna wydatku.....	299
6.9.	Ocena wpływu obrotu własnego ścianek na opór hydrauliczny kanału.....	307
6.10.	Wpływ oporów miejscowych na wydatek przepływu ciśnieniowego.....	310
6.11.	Stabilność przepływu laminarnego między obracającymi się walcami.....	317
7.	WYZNACZENIE SIŁ I ICH MOMENTÓW W PIERŚCIENIOWEJ SZCZELINIE WZDŁUŻNEJ	
7.1.	Uwagi wstępne.....	323
7.2.	Ogólne podejście do wyznaczenia sił i momentów.....	323
7.3.	Składniki ciśnienia, elementarne siły i momenty.....	327
7.3.1.	Składowa ciśnieniowa.....	327
7.3.2.	Strumień wyciskania.....	334
7.3.3.	Składowa inercyjna.....	336
7.4.	Hydrostatyczna siła promieniowa i jej moment.....	339
7.4.1.	Rzuty siły i momentu przepływu ciśnieniowego.....	339
7.4.2.	Natura sił hydrostatycznych.....	341
7.4.3.	Ocena wpływu siły hydrostatycznej na częstość własną drgań giętych wirnika. Przykład liczbowy.....	347
7.5.	Siły i momenty strumienia wyciskania.....	349

7.5.1.	Obliczenie sił i momentów.....	349
7.5.2.	Natura sił strumienia wyciskania.....	351
7.5.3	Wpływ siły tłumiącej i cyrkulacyjnej na dynamiczną stabilność wirnika.....	358
7.6.	Siła bezwładności.....	363
7.7.	Siły, momenty i moc tarcia.....	365
7.8.	Redukcja sił i momentów do nieruchomego układu współrzędnych.	369
7.8.1.	Związek między parametrami kinematycznymi w ruchomym i nieruchomym układzie współrzędnych.....	369
7.8.2.	Rzuty sił i momentów w nieruchomym układzie współrzędnych.....	372
7.8.3.	Klasyfikacja sił i momentów według ich zapisu macierzowego.....	374
8.	WYBRANE KONSTRUKCJE USZCZELNIEŃ BEZSTYKOWYCH	
8.1.	Terminologia i charakterystyka stykowych i bezstykowych uszczelnień zespołów wirujących.....	377
8.1.1.	Uszczelnienia czołowe.....	377
8.1.2.	Uszczelnienia bezstykowe.....	380
8.2.	System dynamiczny, zespół wirujący – uszczelnienie bezstykowe...	382
8.3.	Konstrukcje uszczelnień pomp odśrodkowych.....	385
8.3.1.	Przednie uszczelnienie wirnika.....	385
8.3.2.	Uszczelnienia międzystopniowe.....	392
8.3.3.	Materiały na pierścienie uszczelniające oraz wartości luzów promieniowych.....	394
8.3.4.	Uszczelnienia końcowe.....	396
8.4.	Uszczelnienia z pierścieniami pływającymi.....	398
8.4.1.	Schemat i zasada działania.....	398
8.4.2.	Obszar zastosowania i przykłady konstrukcji.....	399
8.4.3.	Warianty warunków pracy pierścienia pływającego.....	406
8.4.4.	Warunki stacjonarności pierścienia uszczelniającego.....	409
8.5.	Specjalne konstrukcje uszczelnień bezstykowych.....	411
8.5.1.	Odształcalne uszczelnienia pierścieniowe.....	412
8.5.2.	Uszczelnienia labiryntowe.....	415
8.5.3.	Uszczelnienia jako łożyska nośne.....	421

8.5.4.	Pompy bezwałowe.....	423
8.6.	Przykłady wykorzystania bezstykowych uszczelnień pierścieniowych w konstrukcji pomp wysokociśnieniowych.....	425
Dodatek		431
LITERATURA		435
A.	Podstawowa.....	435
B.	Uzupełniająca.....	439
C.	Archiwalna.....	443