

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**В. О. Федотов, І. В. Федотова**

**ГАЗОВІ ПІДВІСИ  
ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2010

УДК 621.822.57

ББК 34.455

Ф34

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 11 від 1 липня 2009 р.)

*Рецензенти:*

**В. А. Огородніков**, доктор технічних наук, професор

**О. В. Нахайчук**, доктор технічних наук, професор

**Федотов, В. О.**

Ф34 Газові підвіси шпindelьних вузлів : монографія /  
В. О. Федотов, І. В. Федотова. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 244 с.  
ISBN 978-966-641-362-1

В роботі описано дослідження та оптимізацію конструктивних параметрів за запропонованими критеріями осьових, радіальних та конічних газових підвісів шпindelьних вузлів. Розглянуто шляхи поліпшення характеристик підвісів різного типу, методики визначення характеристик шпindelьних вузлів з одним та двома радіальними (конічними) підвісами. Проведено оптимізацію конструктивних параметрів шпindelьних вузлів.

Для інженерно-технічних і наукових працівників, а також викладачів, аспірантів, магістрантів та студентів вищих навчальних закладів.

**УДК 621.822.57**

**ББК 34.445**

**ISBN 978-966-641-362-1**

©В. Федотов, І. Федотова, 2010

## Зміст

Основні позначення.....	6
Вступ.....	8
1 Осьові газові підвіси.....	10
1.1 В'язкість.....	10
1.2 Ізотермічна течія газу в зазорах між двома поверхнями.....	12
1.3 Дослідження вісесиметричних осьових підвісів методом гідравлічних опорів.....	16
1.3.1 Дослідження східчастого осьового підвісу.....	19
1.3.2 Задача оптимального проектування осьових підвісів із щільною наддування газу.....	23
1.3.3 Дослідження узагальненої осьового газового підвісу з щільною наддування газу постійного та змінного опорів.....	28
1.4 Вплив непаралельності поверхонь на характеристики осьових підвісів.....	31
2 Радіальні газові підвіси.....	38
2.1 Узагальнений радіальний газовий підвіс.....	38
2.1.1 Тиск газу в зоні радіального підвісу з поздовжніми канавками.....	39
2.1.2 Інтегральні характеристики узагальненого радіального газового підвісу.....	45
2.2 Інтегральні характеристики радіальних підвісів різних конструкцій (окремі випадки узагальненого радіального підвісу)	50
2.3 Оптимізація конструктивних параметрів узагальненого радіального підвісу та його спрощених варіантів.....	52
2.4 Вплив колових потоків газу в робочих каналах радіальних підвісів на їх характеристики.....	66
2.5 Методи поліпшення характеристик газових підвісів.....	72
3 Конічні газові підвіси з поздовжніми канавками.....	84
3.1 Характеристики конічного газового підвісу з поздовжніми канавками.....	86
3.2 Вплив конструктивних параметрів поздовжніх канавок на характеристики конічних підвісів.....	96
4 Шпindelьні вузли на газових підвісах.....	101
4.1 Характеристики газових підвісів при технологічних похибках виготовлення їх деталей.....	101

4.1.1 Вплив овальності вала на характеристики газових підвісів.....	102
4.1.2 Вплив відхилення профілю вала від циліндричності та нерівномірності ширини щілини наддування газу на характеристики підвісів.....	109
4.2 Розрахунок газових підвісів з поздовжніми канавками в формі викружок та лисок.....	118
4.3 Класифікація та аналіз шпинделів за типом геометричної конфігурації робочих поверхонь.....	126
4.4 Класифікація та аналіз шпинделів за типом зовнішніх дроселюючих пристроїв.....	130
4.5 Класифікація та аналіз шпинделів за типом профілювання робочих поверхонь.....	132
4.6 Розрахунок статичних характеристик газових підвісів шпиндельних вузлів.....	134
4.6.1 Шпиндельний вузол з одним радіальним або конічним підвісом.....	134
4.6.2 Шпиндельний вузол з двома радіальними підвісами...	137
4.6.3 Оптимізація параметрів шпиндельних вузлів на газових конічних підвісах, профільованих поздовжніми канавками....	138
4.7 Аналіз явища самозбудження осьових коливань в шпиндельних вузлах на конічних підвісах з поздовжніми канавками....	143
4.8 Шпиндельні вузли на газових підвісах з поздовжніми канавками.....	146
4.8.1 Загальні вимоги до матеріалів газових підвісів шпиндельних вузлів.....	146
4.8.2 Шпиндельні вузли на газових підвісах з обробки кристалів.....	147
4.8.3 Шпиндельні вузли на конічних газових підвісах.....	154
Висновки.....	163
Література.....	166
Додаток А. Статичні характеристики осьових газових підвісів та результати їх оптимального проектування.....	177
A1 Східчастий осьовий підвіс з однією відкритою границею.....	177
A2 Східчастий осьовий підвіс з двома відкритими границями.	179

А3 Осьовий підвіс з зовнішнім дроселем та однією відкритою границею.....	183
А4 Осьовий підвіс з зовнішнім дроселем та двома відкритими границями.....	185
А5 Осьовий підвіс з однією відкритою границею, постійним зовнішнім дроселем та східчастим робочим зазором.....	187
А6 Осьовий підвіс з двома відкритими границями, постійним зовнішнім дроселем та східчастим робочим зазором.....	190
Додаток Б. Результати оптимального проектування радіальних газових підвісів та номограми для визначення їх характеристик...	193
Б1 Радіальний підвіс з поздовжніми канавками.....	193
Б2 Узагальнений радіальний підвіс.....	199
Б3 Радіальний підвіс з щілиною наддування газу.....	206
Б4 Радіальний підвіс з двома щілинами наддування газу.....	213
Б5 Здвоєний узагальнений радіальний підвіс.....	220
Б6 Здвоєний радіальний підвіс з щілиною наддування газу.....	222
Додаток В. Статичні характеристики та відповідні оптимальні конструктивні параметри конічного газового підвісу з поздовжніми канавками.....	224
Додаток Г. Характеристики шпіндельних вузлів на конічних газових підвісах з поздовжніми канавками.....	229

## ОСНОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$r, \varphi, z$  – координати циліндричної системи;

$h_0$  – номінальний зазор осьового підвісу;

$h$  – зазор в робочому газовому шарі осьового підвісу;

$\Delta h = h - h_0$  – абсолютне осьове переміщення;

$\zeta = \frac{\Delta h}{h_0}$  – відносне осьове переміщення;

$r_0$  – радіус зовнішньої границі осьового підвісу;

$\rho = \frac{r}{r_0}$  – безрозмірна координата;

$\sigma$  – глибина сідця поздовжньої канавки;

$c$  – зазор між концентричними робочими поверхнями підвісів;

$\nu = \frac{c}{c + \sigma}$  – параметр плавності зазору;

$\delta$  – ширина щілини наддування газу;

$e$  – ексцентриситет;

$\varepsilon = \frac{e}{c}$  – відносний ексцентриситет;

$\varphi_1, \varphi_2$  – центральні кути, що належать відповідно канавці та виступу у радіального та конічного підвісів;

$\varkappa = \frac{\varphi_1}{\varphi_1 + \varphi_2}$  – відносна ширина канавки;

$2l_0$  – довжина радіального підвісу;

$2l_1$  – довжина поздовжніх канавок;

$2R_0$  – діаметр вала радіального підвісу;

$2R$  – зовнішній діаметр втулки радіального підвісу;

$\lambda = \frac{l_0}{R_0}$  – відносна довжина радіального підвісу;

$\alpha = \frac{l_1}{l_0}$  – відносна довжина поздовжніх канавок;

$n$  – кількість поздовжніх канавок;

$\xi = \frac{r}{l_0}$  – безрозмірна осьова координата;

$\psi$  – параметр щілини наддування газу;

$\theta$  – коефіцієнт ізотропності зони підвісу з поздовжніми канавками;

$p_a$  – тиск в середовищі навколо підвісу;

$P_n$  – абсолютний тиск від зовнішнього джерела (компресора, ресівера);

$P = \frac{p}{p_a}$  – безрозмірний тиск газу в робочому зазорі підвісу;

$U = P^2$  – квадрат безрозмірного тиску;

$F$  – піднімальна сила підвісу;

$F_\varepsilon$  – радіальна піднімальна сила підвісу;

$F_\zeta$  – осьова піднімальна сила кінцевого підвісу;

$M$  – відновний момент газового шару при кутових переміщеннях вала;

$K$  – жорсткість підвісу;

$Q$  – витрати газу для роботи підвісу;

$\rho$  – густина газу (повітря) при атмосферному тиску;

$\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості газу;

$k$  – відношення густини газу до тиску при даній температурі в газовому шарі;

$F^* = \frac{F}{\pi p_a r_0^2}$  – безрозмірна піднімальна сила осьового підвісу;

$K^* = \frac{dF^*}{d\zeta}$  – безрозмірна жорсткість осьового підвісу;

$F_\varepsilon^* = \frac{F_\varepsilon}{4R_0^2 p_a}$  – безрозмірна радіальна піднімальна сила радіального та

кінцевого підвісів;

$F_\zeta^* = \frac{F_\zeta}{4R_0^2 p_a}$  – безрозмірна осьова піднімальна сила кінцевого підві-

су;

$M^* = \frac{M}{4R_0^2 p_a}$  – безрозмірний відновний момент;

$K_\varepsilon^* = \frac{dF_\varepsilon^*}{d\varepsilon}$  – безрозмірна радіальна жорсткість;

$K_\zeta^* = \frac{dF_\zeta^*}{d\zeta}$  – безрозмірна осьова жорсткість;

$K_v^* = \frac{dM^*}{dv}$  – безрозмірна кутова жорсткість;

$Q^* = \frac{12\mu}{\pi k p_a^2 c^3} Q$  – безрозмірні витрати газу.

## ВСТУП

Якщо на початку минулого століття ідея використовувати газ для опор ковзання сприймалася як фантазія, то в сучасній техніці опори із змащенням газом використовуються в шпindelних вузлах різного призначення верстатів, вимірювальних приладах, турбошліфувальних машинах, турбодетандерах, турбокомпресорах, гіроскопах тощо.

Впровадження опор з газовим змащенням в різні галузі промисловості пов'язано з необхідністю створення високотехнологічного обладнання в якому використовувалися би надзвичайні переваги газу у порівнянні з рідиною: їх хімічна та структурна стабільність в дуже широкому діапазоні температур та тиску; мінімальні витрати на тертя; при роботі не забруднюються вироби та навколишнє середовище (екологічно чисті); успішно працюють в умовах підвищеної радіації та агресивному середовищі; відсутність зносу робочих поверхонь. Але газовим опорам притаманні і недоліки. Мала їх в'язкість є причиною відносно невеликої піднімальної сили і малої демпфуючої властивості газового шару. Також газові опори мають нестійкі режими роботи при деяких значеннях їх конструктивних та експлуатаційних параметрів. Переваги газових опор найбільшою мірою проявляються в високоточних вузлах виробів які працюють при незначних динамічних навантаженнях без великого діапазону зміни статичних.

В монографії розглядаються дослідження, пошук критеріїв оптимізації, оптимального проектування газових підвісів різного типу в яких піднімальна властивість газового шару забезпечується в основному подачею стиснутого повітря від зовнішнього джерела в робочі зазори.

Відомі газові підвіси за принципом роботи можна розділити на два класи. До першого відносяться підвіси з зовнішньою компенсацією в вигляді отворів малого діаметра, діафрагм, щілин та пористих вставок. Другий клас складають підвіси з внутрішньою компенсацією за рахунок східчастої форми робочого зазору або глухих поздовжніх канавок.

Починаючи з наукових праць С. А. Шейнберга на сьогоднішній день найбільш дослідженими є підвіси першого класу з отворами малого діаметра. Але подача газу через лінію отворів малого діаметра приводить до різкого зменшення тиску в невеликих ділянках газового



шару, що локалізовані навколо отворів, а в інших ділянках несучого робочого шару тиск газу відносно невеликий, що зменшує піднімальну силу підвісу. Цей недолік можна дещо виправити якщо вихідні отвори з'єднати мікроканавкою глибиною до 0,3 мм.

Розвиток газових підвісів з наддуванням газу через пористі поверхні стримується відсутністю пористих матеріалів з необхідними і найбільшими властивостями.

Дослідженню, оптимальному проектуванню та впровадженню в виробництво газових підвісів з щілинами наддування газу, східчастим робочим зазором, з поздовжніми канавками відведено набагато менше наукових праць у порівнянні з підвісами в яких газ подається через отвори малого діаметра.

Тому актуальними є такі задачі:

- розробка методів розрахунку осьових та радіальних газових підвісів з подвійною компенсацією (зовнішньою, що здійснюється щільною наддуванням газу, та внутрішньою, за рахунок східчастої форми робочого зазору або глухих поздовжніх канавок) і конічних газових підвісів з поздовжніми канавками;

- дослідження газових осьових, радіальних та конічних підвісів з зовнішньою, внутрішньою або подвійною компенсацією, з метою виявлення їх переваг та недоліків, і пошук шляхів поліпшення їх характеристик;

- пошук екстремумів у інтегральних характеристиках (піднімальна сила, жорсткість, відновний момент, витрати газу) газових підвісів або практично важливих сполук цих характеристик і знаходження конструктивних параметрів при яких ці екстремуми реалізуються;

- експериментальна перевірка теоретичних висновків і впровадження результатів роботи в виробництво.

Автори вдячні доктору технічних наук, професору А. В. Ємельянову за поради та зауваження, а кандидату фізико-математичних наук В. І. Степанчуку за допомогу в розрахунках.

# 1 ОСЬОВІ ГАЗОВІ ПІДВІСИ

## 1.1 В'язкість

Розглянемо течію газу між двома близько розташованими паралельними поверхнями, одна з яких нерухома, а друга рухається з швидкістю  $u$  (рис. 1.1). Відстань між пластинами  $h$ .

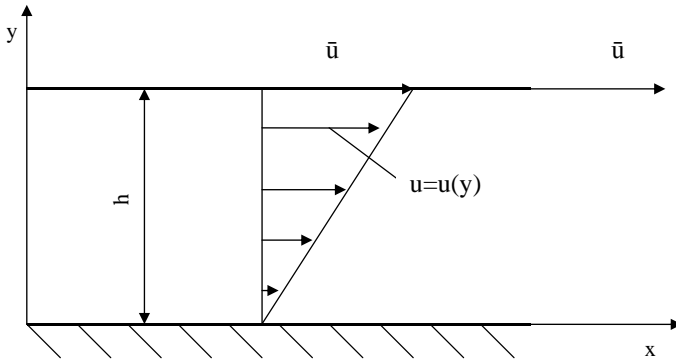


Рисунок 1.1 – Розподіл швидкостей частинок газу між двома паралельними пластинами

Газ на границі з поверхнею може мати швидкість поверхні або відриватися від неї в залежності від значення числа Кнудсена

$$K_n = l_m / h$$

де  $l_m$  – місцева середня довжина пробігу молекул газу (для повітря  $l_m = 0,06 \cdot 10^{-6}$  м, а для гелію  $l_m = 0,2 \cdot 10^{-6}$  м).

При малих числах Кнудсена ( $K_n < 0,01$ ) можна вважати, що на границі з поверхнею частинки газу набувають її швидкість. Із дослідів маємо [39, 82], що швидкість газу змінюється по висоті  $h$  за лінійним законом якщо в напрямку осі  $X$  тиск залишається сталим:

$$V = u \frac{y}{h}. \quad (1.1)$$

Внаслідок внутрішнього тертя між частинками газу переміщення верхньої поверхні гальмується, причому на елемент поверхні площею  $ds$  діє сила опору  $dF$ , яка пропорційна швидкості  $u$  поверхні та обернено пропорційна відстані  $h$  між поверхнями:

$$dF = dF = \mu \frac{u}{h} ds, \quad (1.2)$$

де  $\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості газу.

Формулу (1.2), враховуючи (1.1), можна записати в вигляді:

$$dF = \mu \frac{dV}{dy} ds \quad (1.3)$$

Якщо силу тертя віднести до одиниці площі  $\tau = \frac{dF}{ds}$  (дотичні напруження), тоді з виразу (1.3) отримаємо закон тертя Ньютона:

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy} \quad (1.4)$$

Динамічний коефіцієнт в'язкості у газів із збільшенням температури збільшується (табл. 1.1), але настільки повільно, що в звичайних умовах експлуатації газових опор (підвісів) коефіцієнт  $\mu$  можна вважати практично сталою величиною ( $\mu = \text{const}$ ).

Таблиця 1.1 – Динамічний коефіцієнт в'язкості  $\mu$  в мікропаузах ( $10^{-7} \frac{H \cdot c}{m^2}$ ) в залежності від температури  $t$  (шкала Цельсія)

t	Газ або суміш газів								
	Водень	Водяна пара	Азот	Оксид карбону	Повітря	Гелій	Кисень	Аргон	Неон
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
50 <sup>0</sup>	93	111	188	189	195	208	218	242	329
25 <sup>0</sup>	90	100	177	178	186	198	203	230	317

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20 <sup>0</sup>	88	98	174	177	181	194	200	222	310
10 <sup>0</sup>	86	-	170	171	177	190	196	220	304
0 <sup>0</sup>	84	-	166	166	171	186	192	212	298
-10 <sup>0</sup>	81	-	161	161	166	180	186	205	291
-25 <sup>0</sup>	78	-	154	154	158	175	177	195	279
-50 <sup>0</sup>	72	-	141	141	145	162	162	178	259

## 1.2 Ізотермічна течія газу в зазорах між двома поверхнями

Теорія підвісів з газовим змащенням базується на рівняннях Нав'є–Стокса з такими припущеннями:

- 1) зазори між поверхнями значно менші від розмірів поверхонь;
- 2) рух газу в зазорах стаціонарний і відносно повільний, тобто сили в'язкого зсуву значно більші сил інерції;
- 3) рух газу вважається ізотермічним, тобто температура в мастильному шарі стала.

Спрощені рівняння Нав'є–Стокса (рівняння Рейнольда [44, 45, 80]) в довільній ортогональній координаті (рис. 1.2) запишуться в вигляді:

$$\frac{1}{H_1} \cdot \frac{\partial P}{\partial q_1} = \mu \frac{\partial^2 V_1}{\partial q_3^2}; \quad \frac{1}{H_2} \cdot \frac{\partial P}{\partial q_2} = \mu \frac{\partial^2 V_2}{\partial q_3^2}; \quad \frac{\partial P}{\partial q_3} = 0; \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial q_1}(\rho V_1 H_2) + \frac{\partial}{\partial q_2}(\rho V_2 H_1) + \frac{\partial}{\partial q_3}(\rho V_3 H_1 H_2) = 0, \quad (1.6)$$

де  $q_1, q_2, q_3$  – криволінійні координати;  $\rho$  – густина газу;  $P$  – тиск газу в мастильному шарі;  $V_1, V_2, V_3$  – проекції швидкості на координатні осі;  $H_1, H_2, H_3$  – коефіцієнти Ляме ( $H_3 = 1$ , оскільки координата  $q_3$  лінійна).

Рівняння (1.5) справджуються при дотриманні умов [82]:

$$\text{Re} = \frac{\text{сила інерції}}{\text{сила тертя}} = \frac{\rho \cdot v_{\max} \cdot h}{\mu} \leq \text{Re}_{\text{кр}}; \quad \frac{h}{l_i} \ll 1, \quad (1.7)$$

де  $\text{Re}$  – число Рейнольда;  $h$  – товщина газового шару;  $l_i$  – протяжність газового шару ( $i = 1, 2$ ).

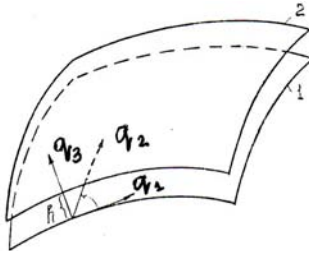


Рисунок 1.2 – Система координат на поверхнях в газовому шарі

Нерівність (1.7), що виражає умову ламінарності течії газу, виконується при  $Re_{sp} = 500 \dots 1000$  [82].

Традиційним в теорії газових опор є умова ізотермічності [13, 23, 38, 39, 44, 46, 77, 88]. Рівняння стану ідеального газу має вигляд [38, 45, 80]:

$$\frac{P}{\rho} = RT = const, \quad (1.8)$$

де  $R$  – універсальна газова стала;  $T$  – абсолютна температура.

Розгляд неізотермічних аспектів течії газу в тонкому шарі як мас-тила аналізується, наприклад в роботі [22].

Розглянемо течію газу в напрямку осі  $x$  між паралельними нерухомими площинами (рис. 1.3) при умовах

$$h \ll (x_2 - x_1); \quad h \ll l; \quad Re_{sp} < 500.$$

Із рівнянь (1.5), (1.7) отримуємо масові витрати  $Q$  газу через зазор  $h$  в напрямку осі  $x$  ( $q_1 = x$ ;  $q_2 = z$ ;  $q_3 = y$ ;  $H_1 = H_2 = 1$ ;  $V_2 = V_3 = 0$ ;  $P = P_1$  при  $x = x_1$ ; при  $P = P_2$  при  $x = x_2$ ).

$$Q = \frac{klh^3 (P_1^2 - P_2^2)}{24\mu(x_2 - x_1)}. \quad (1.9)$$

Введемо до розгляду величину

$$R = \frac{24\mu(x_2 - x_1)}{klh^3}. \quad (1.10)$$

В коефіцієнт  $R$  входять конструктивні параметри проточного каналу, величини  $\mu$  та  $k$ , що залежать від газу і тому  $R$  логічно називати опором (гідрравлічним опором) течії цього газу.

Якщо  $u$  – квадрат тиску в газовому шарі, тоді рівняння (1.9) запишеться:

$$Q = \frac{u_1 - u_2}{R}, \quad (1.11)$$

де  $u_1 = P_1^2$ ;  $u_2 = P_2^2$ .

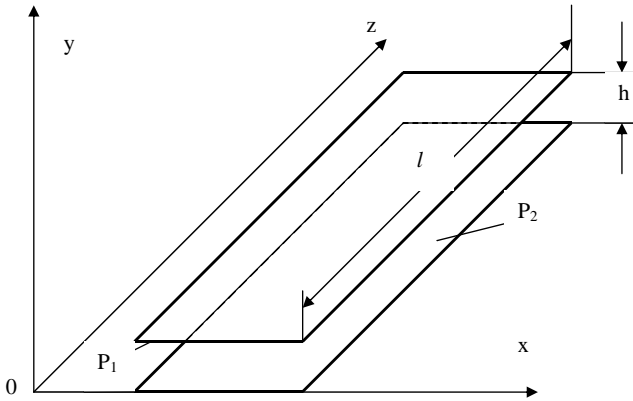


Рисунок 1.3 – Течія газу між паралельними пластинами в напрямку осі x

Таким чином, витрати газу через проточний канал між паралельними пластинами (див. рис. 1.3) дорівнюють частці від ділення різниці квадратів тиску на границях гідравлічного опору.

Якщо виділити ділянку газового шару шириною  $l$ , висотою  $h$  (рис. 1.3) та протяжністю  $dx$ , тоді з (1.11) отримаємо:

$$Q = -\frac{du}{dR}, \quad (1.12)$$

де  $u$  відповідності з (1.10)

$$dR = \frac{24\mu}{klh^3} dx. \quad (1.13)$$

Оскільки, довільний вісесиметричний канал можна розділити на нескінченну кількість малих елементів таким чином, що кожен з них буде мати практично прямокутну форму і сталий зазор, а течія газу ламінарна, тому отримані результати (1.9)–(1.13) можна використати у випадку довільних вісесиметричних каналів.

Розглянемо шар газу між співвісними конічними поверхнями (рис. 1.4). Гідравлічний опір  $dR_i$  виділеної ділянки каналу на

підставі (1.13) при  $dx = \frac{dr}{\sin \alpha}$ ;  $l = r \cdot d\varphi$ ;  $dR_i = \frac{24\mu dr}{kh^3 r \sin \alpha d\varphi}$ ,

де  $\alpha$  – кут конусності;  $h$  – зазор між конічними поверхнями.

Гідравлічний опір  $dR$  ділянки конічної форми протяжністю  $\frac{dr}{\sin \alpha}$  буде в  $\frac{2\pi}{d\varphi}$  раз менший від  $dR_1$ .

$$dR = \frac{12\mu dr}{\pi kh^3 r \sin \alpha}. \quad (1.14)$$

Якщо рівняння (1.12), враховуючи (1.14), проінтегрувати при граничних умовах:

$$u = u_1 \text{ при } r = r_1,$$

$$u = u_2 \text{ при } r = r_2,$$

то отримаємо:

$$u_1 - u_2 = Q \frac{12\mu \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\pi kh^3 \sin \alpha}$$

$$\text{або } u_1 - u_2 = QR,$$

$$\text{де } R = \frac{12\mu \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\pi kh^3 \sin \alpha}. \quad (1.15)$$

При  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  із рівнянь (1.14) та (1.12) отримаємо рівняння розподілу тиску в каналі між

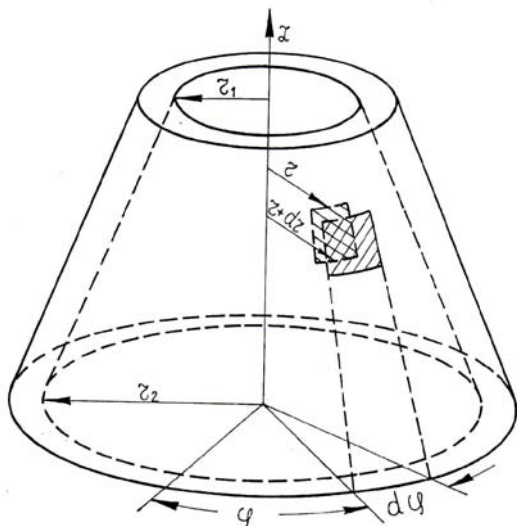


Рисунок 1.4 – Шар газу між співвісними конічними поверхнями

пластинами кільцевої форми (рис. 1.5).

$$\frac{du}{dr} = -\frac{12\mu Q}{\pi kh^3 r}. \quad (1.16)$$

Гідравлічний опір каналу кільцевої форми з (1.15) при  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ .

$$R = \frac{12\mu \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\pi kh^3}. \quad (1.17)$$

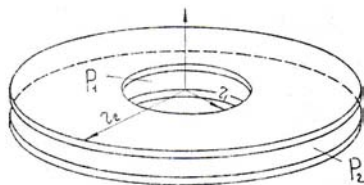


Рисунок 1.5 – Шар газу між кільцевими пластинами

Якщо газ рухається між двома співвісними циліндричними повер-

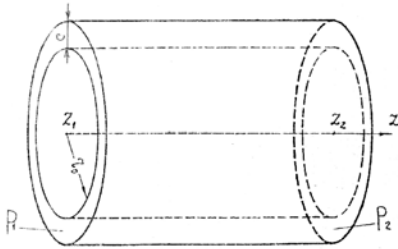


Рисунок 1.6 – Шар газу між співвісними циліндричними поверхнями

хнями (рис. 1.6) радіуса  $r_0$ , тоді з формул (1.9), (1.12) та (1.13), замінивши в них  $x_2 - x_1 = z_2 - z_1$ ,  $l = 2\pi r_0$ ,  $h = c$ ,  $dx = dz$  отримаємо:

$$\frac{du}{dz} = -\frac{12\mu Q}{\pi k c^2 r_0}, \quad (1.18)$$

$$R = \frac{12\mu(z_2 - z_1)}{\pi k c^3 r_0}. \quad (1.19)$$

Таким чином, знайдемо розподіл тиску та гідравлічний опір руху газу в каналах різної форми.

### 1.3 Дослідження вісесиметричних осьових підвісів методом гідравлічних опорів

В узагальненій моделі осьового підвісу (рис. 1.7), газ під тиском  $P_H$  подається на вхід каналу 2 і, протікаючи послідовно через кільцеві канали 1 та 0, витікає в навколишнє середовище на відкритій границі підвісу.

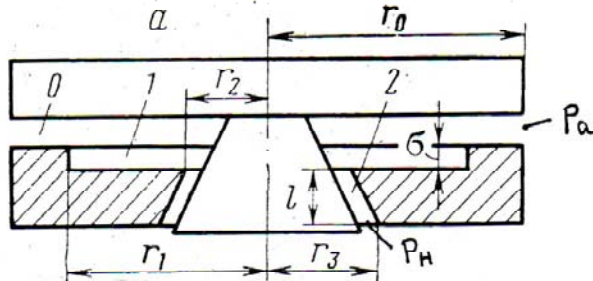


Рисунок 1.7 – Узагальнена модель осьового підвісу

Якщо  $h_i$  – зазор в  $i$ -му каналі газового шару ( $i=0, 1, 2$ );  $\sigma = \frac{\Delta h}{h_0}$  –

відносна зміна осьового зазору;  $h_0$  – товщина шару газу на ділянці 0 при  $\zeta = 0$ , тоді на підставі (1.15) та (1.17) знайдемо гідравлічний опір трьох ділянок узагальненої моделі осьового підвісу



$$R_0 = \frac{12\mu \ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right)}{\pi k h_v^3 (1+\zeta)^3}; R_1 = \frac{12\mu \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{\pi k (\sigma + h_v (1+\zeta))^3}; R_2 = \frac{12\mu \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{\pi k (c - h_v \zeta \sin \alpha)^3 \sin \alpha}. \quad (1.20)$$

Використовуючи (1.11), витрати газу  $Q$  через осьовий підвіс знаходяться з формули:

$$Q = \frac{P_n^2 - P_a^2}{R_0 + R_1 + R_2} = \frac{P_{01}^2 - P_a^2}{R_0} = \frac{P_{12}^2 - P_{01}^2}{R_1} = \frac{P_{12}^2 - P_a^2}{R_0 + R_1}, \quad (1.21)$$

де  $P_n$  – тиск газу від джерела стиснутого газу (компресора);  $P_a$  – тиск газу в навколишньому середовищі;  $P_{ij}$  – тиск газу на границі ділянок.

Розглядаючи вирази (1.20) і (1.21) спільно, знаходимо безрозмірний тиск  $P_{01} = \frac{P_{01}}{P_a}$  і  $P_{12} = \frac{P_{12}}{P_a}$  на границях ділянок та витрати газу  $Q$  через осьовий підвіс.

$$P_{01}^2 = 1 + \frac{P_n^2 - 1}{1 + v^3 (\beta + \psi \eta (1 + \zeta)^3)}; P_{12}^2 = 1 + \frac{P_n^2 - 1}{1 + \psi \eta (1 + \zeta)^3}; Q = \frac{\pi k P_a^2 h_0^3}{12\mu} Q^*;$$

де

$$\psi = \frac{\ln(1 + (\lambda/\rho_2) t q \alpha)}{(\gamma - v \zeta \sin \alpha)^3 \ln(1/\rho_2) \sin \alpha}; \eta = \frac{\ln(1/\rho_2)}{\ln(1/\rho_1)};$$

$$\beta = \frac{(1 + \zeta)^3 \ln(\rho_1/\rho_2)}{(1 + v \zeta)^3 \ln(1/\rho_1)}; \eta_1 = \frac{\eta v^3}{1 + \beta v^3}; \lambda = \frac{l}{r_0};$$

$$v = \frac{h_v}{h_v + \sigma}; \gamma = \frac{c}{h_0 + \sigma}; \rho_1 = \frac{r_1}{r_0}; \rho_2 = \frac{r_2}{r_0};$$

$$Q^* = \frac{(P_{12}^2 - 1)(1 + \zeta)^3 (1 + v \zeta)^3}{(1 + v \zeta)^3 \ln(1/\rho_1) + v^3 (1 + \zeta)^3 \ln(\rho_1/\rho_2)} - \text{безрозмірні витрати газу.}$$

Диференціальні рівняння для визначення функцій  $u_0$ ,  $u_1$  та  $u_2$  отримаємо на підставі (1.12), (1.14), (1.16) і (1.21).

$$\frac{du_0}{dr} = - \frac{P_{01}^2 - P_a^2}{r \ln(r_0/r_1)};$$

$$\frac{du_1}{dr} = -\frac{P_{12}^2 - P_{01}^2}{r \ln(r_1/r_2)};$$

$$\frac{du_2}{dr} = \frac{P_u^2 - P_{12}^2}{r \ln(r_3/r_2)}.$$

Із цих рівнянь та умов на границях ділянок:

$$u_0 = P_{01}^2 \text{ при } r = r_1;$$

$$u_1 = P_{12}^2 \text{ при } r = r_2;$$

$$u_2 = P_{12}^2 \text{ при } r = r_2.$$

знаходимо квадрати безрозмірного тиску в трьох ділянках газового шару осьового підвісу.

$$P_0^2 = P_{01}^2 - (P_{01}^2 - 1) \frac{\ln(\rho/\rho_1)}{\ln(1/\rho_1)};$$

$$P_1^2 = P_{12}^2 - (P_{12}^2 - P_{01}^2) \frac{\ln(\rho/\rho_2)}{\ln(\rho_1/\rho_2)};$$

$$P_2^2 = P_{12}^2 - (P_u^2 - P_{12}^2) \frac{\ln(\rho/\rho_2)}{\ln(\rho_3/\rho_2)}.$$
(1.22)

Тепер можемо знайти піднімальну силу  $F$  узагальненого осьового підвісу.

$$F = \pi r_0^2 p_a F^*;$$

$$F^* = 2 \int_{\rho_1}^1 P_0 \rho d\rho + 2 \int_{\rho_2}^{\rho_1} P_1 \rho d\rho - 2 \int_{\rho_2}^{\rho_3} P_2 \rho d\rho + P_u \rho_3^2 - 1,$$
(1.23)

де  $F^*$  – безрозмірна піднімальна сила.

Оскільки проекція каналу 2 на площину, що ортогональна до осі підвісу, буде відносно невелика при малих кутах  $\alpha$  та помірних  $\lambda$  ( $l=2\dots 6$  мм) у порівнянні з площами ділянок 0 та 1, тоді



де

$$Q^* = \frac{(P_n^2 - 1)(1 + \zeta)^3 (1 + \nu \zeta)^3}{(1 + \nu \zeta)^3 \ln(1/\rho_1) + \nu^3 (1 - \zeta)^3 \ln(\rho_1/\rho_2)}; \quad (1.26)$$

$$P_{01}^2 = 1 + \frac{(P_n^2 - 1)(1 + \nu \zeta)^3 \ln(1/\rho_1)}{(1 + \nu \zeta)^3 \ln(1/\rho_1) + \nu^3 (1 + \zeta)^3 \ln(\rho_1/\rho_2)}.$$

Безрозмірна жорсткість східчастого осьового підвісу

$$K^* = \frac{dF^*}{d\zeta} = \frac{dF^*}{dP_{01}^2} \cdot \frac{dP_{01}^2}{d\zeta};$$

$$K^* = - \frac{3\nu^3 (1 - \nu)(1 + \zeta)^2 (1 + \nu \zeta)^2 (P_n^2 - 1)}{\left[ (1 + \nu \zeta)^3 \ln(1/\rho_1) + \nu^3 (1 + \zeta)^3 \ln(\rho_1/\rho_2) \right]^2} \cdot I, \quad (1.27)$$

$$\text{де } I = \int_{\rho_2}^{\rho_1} \frac{\ln(1/\rho_1) \ln(\rho/\rho_2) \rho d\rho}{\sqrt{P_n^2 - (P_n^2 - P_{01}^2) \frac{\ln(\rho/\rho_2)}{\ln(\rho_1/\rho_2)}}} + \int_{\rho_1}^1 \frac{\ln(\rho_1/\rho_2) \ln(1/\rho) \rho d\rho}{\sqrt{P_{01}^2 - (P_{01}^2 - 1) \frac{\ln(\rho/\rho_1)}{\ln(1/\rho_1)}}}. \quad (1.28)$$

Для того, щоб осьовий підвіс був статично стійким його піднімальна сила повинна збільшуватися при наближенні робочих поверхонь і зменшуватися при збільшенні зазору. Тобто жорсткість  $K^*$  ( $I > 0$ ) повинна бути від'ємною.

Проведемо аналіз безрозмірної жорсткості  $K^*$  (1.27) осьового підвісу.

1.  $K^* < 0$ , якщо  $0 < \nu < 1$ . Осьовий підвіс має від'ємну жорсткість і працездатний коли канал на вході стиснутого газу має більший зазор ніж на виході.

2.  $K^* > 0$  в двох випадках: при  $\nu = 0$  глибина  $\sigma$  має нескінченно велике значення і робоча поверхня підвісу обмежується радіусами  $r_1$  та  $r_0$ ; при  $\nu = 1$ , що відповідає  $\sigma = 0$  і робоча поверхня – кільце з радіусами  $r_1$  та  $r_0$ . В цих випадках осьовий підвіс непрацездатний (статично нестійкий).

3.  $K^* > 0$  при  $\sigma < 0$ , що відповідає випадку коли проточний канал на виході стиснутого газу має зазор більший ніж на вході. Такий осьовий підвіс непрацездатний, оскільки при зменшенні робочого зазору  $F^*$  падає, а при збільшенні – зростає.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов А. М. Метод определения характеристик однорядных газостатических подшипников / А. М. Антонов, Г. А. Турыгин // *Машиноведение*. – 1969. – № 6. – С. 98–102.
2. Антонов А. М. Расчет двухсторонних кольцевых упорных подшипников с внешним наддувом / А. М. Антонов, Н. П. Седько // *Газовые опоры турбомашин : труды Всесоюз. межвуз. сов., сент. 1973 г.* – Казань, 1975. – С. 43–46.
3. А. с. 838915 СССР, МКУ Н 02 К 5 / 00. Электрическая машина с газостатическим подшипником / В. А. Федотов (СССР). – № 2823818 : Заявл. 20. 09. 1981. ; опуб. 15. 06. 1981, Бюл. № 22. – 2 с.
4. А. с. 1139913 СССР, МКУ F 16 С 32 / 06. Газостатический подшипник / А. В. Емельянов, В. А. Федотов (СССР). – № 3572750 ; Заявл. 06. 04. 1983. ; опуб. 15. 02. 1985, Бюл. № 6. – 2 с.
5. А. с. 1246250 СССР, МКУ Н 02 К 5 / 00. Электрическая машина / В. А. Федотов (СССР). – № 3805737 ; Заявл. 29. 10. 1984; опуб. 23. 07. 1986, Бюл. № 27. – 3 с.
6. Баласаньян В. С. Определение угловой жесткости кольцевого аэростатического подпятника / В. С. Баласаньян // *Машиноведение*. – 1977. – № 3. – С. 93–99.
7. Баласаньян В. С. Расчет радиальных аэростатических подшипников / В. С. Баласаньян // *Станки и инструмент*. – 1983. – № 3. – С. 18–19.
8. Баласаньян В. С. Подъемная сила циркулярного аэростатического подшипника при произвольном эксцентриситете / В. С. Баласаньян // *Машиноведение*. – 1984. – № 6. – С. 78–83.
9. Бахвалов Н. С. Численные методы. Ч. 1 / Н. С. Бахвалов. – М. : Наука, 1973. – 631 с.
10. Безродный В. Г. Статические характеристики сферических пористых газовых подшипников / В. Г. Безродный, Н. П. Седько // *Газовая смазка в машинах и приборах : Всесозн. коорд. совещ., 18 – 20 сент. 1989 г. : тезисы докл.* – М., 1989. – С. 26.
11. Болдырев Ю. Я. Однорядный радиальный газовый подшипник с максимальной несущей способностью / Ю. Я. Болдырев, М. Е. Слесарев // *Машиноведение*. – 1987. – № 4. – С. 97–193.

12. Борисова Ю. В. Влияние погрешностей геометрии радиальных опор с наддувом на их устойчивость / Ю. В. Борисова, Е. Г. Грудская // Трение, износ и смазочные материалы : междуна­род. науч. конф., 22 – 26 мая 1985 г. : тезисы докл. т. 4. – Ташкент, 1985. – С. 41–42.
13. Гросс У. А. Обзор работ в области газовых подшипников с внешним наддувом за период с 1959 г. / У. А. Гросс // Проблемы трения и смазки. – 1969. – Т. 91, № 4. – С. 180–185.
14. Грудская Е. Г. Характеристики гибридного радиального подшипника на газовой смазке / Е. Г. Грудская, Заблоцкий Н. Д. // Машиноведение. – 1976. – № 5. – С. 93–98.
15. Грудская Е. Г. Расчет несущей способности радиальных газовых подшипников с дискретным наддувом / Е. Г. Грудская, В. С. Карпов // Машиноведение. – 1976. – № 2. – С. 73–77.
16. Грудская Е. Г. Влияние вторичного дросселирования на динамические характеристики радиальных газовых опор / Е. Г. Грудская // Трение и износ. – 1982. – Т. 3, № 4. – С. 674–683.
17. Ди. Современное состояние разработок подшипников с питающими щелями / Ди (С. W. Dee), Шайрс (G. L. Shires) // Проблемы трения и смазки. – 1971. – № 4. – С. 1–9.
18. Деркач Н. А. Теория и расчет осесимметричных подвесов с газовой смазкой при наличии осевых, радиальных и нутационных смещений подвижного элемента / Н. А. Деркач // Надежность роторных систем с опорами на газовой смазке : школа-семинар, 1–5 окт. 1990 г. : тезисы докл. – М.: 1990. – С. 31.
19. Добровольский Г. Г. Применение опор с газовой смазкой в шпинделях и поворотных столах для станков сверхвысокой точности / Г. Г. Добровольский, В. С. Крячек // Исследование и применение опор скольжения с газовой смазкой : Всесоюзное координационное совещание, 12–14 мая 1983 г. : тезисы докл. – Винница, 1983. – С. 57.
20. Добровольский Г. Г. Экспериментальные исследования и технология изготовления аэро­статических опор из пористого графита / Г. Г. Добровольский, В. Н. Скалыга, А. Н. Денисенко // Исследование и применение опор скольжения с газовой смазкой : Всесоюзное координационное совещание, 12–14 мая 1983 г. : тезисы докл. – Винница, 1983. – С. 78–79.

21. Жедь В. П. Применение в промышленности опор с газовой смазкой / В. П. Жедь, С. В. Пинегин, Ю. Б. Табачников // Станки и инструмент. – 1977. – № 12. – С. 1–3.
22. Заблоцкий Н. Д. К вопросу о постановке неизотермических задач теории газовой смазки / Н. Д. Заблоцкий // Машиноведение. – 1982. – №4. – С. 77–81.
23. Емельянов А. В. Теория подшипника со спиральными канавками, учитывающая эффект скольжения и местной сжимаемости / А. В. Емельянов, Л. С. Емельянова // Известия АН СССР, МЖГ. – 1971. – № 5. – С. 84–93.
24. Емельянов А. В. Статика спиральных осевых опор скольжения / Емельянов А. В., Емельянова Л. С. – Красноярск : МВ и ССО РСФСР, 1972. – 58 с.
25. Емельянов А. В. Оптимальные параметры цилиндрического газового подвеса с двумя щелями наддува / А. В. Емельянов, Л. С. Емельянова, В. А. Федотов // Газовые опоры турбомашин : труды Всесоюз. межвуз. сов., сент. 1973 г. – Казань, 1975. – С. 34–36.
26. Емельянов А. В. Расчет газостатической опоры с односторонним осевым нагружением и неразделенным питанием торцевого и радиального подшипников / А. В. Емельянов, Л. С. Емельянова, В. А. Федотов, Г. З. Шнайдер // Газовые опоры турбомашин : труды Всесоюз. межвуз. сов., сент. 1973 г. – Казань, 1975. – С. 37–43.
27. Емельянов А. В. Расчет и оптимальные параметры радиальных газостатических подшипников / А. В. Емельянов, Г. В. Киселев, Г. Н. Писарев // Машиноведение. – 1975. – № 4. – С. 97–103.
28. Емельянов А. В. Исследование газостатических подпятников и улучшение их характеристик / А. В. Емельянов, В. А. Федотов, Г. Г. Дзюбинский // Машиноведение. – 1976. – № 3. – С. 96–105.
29. Емельянов А. В. Характеристики радиальных газостатических опор с двойным дросселированием газового потока / А. В. Емельянов, В. А. Федотов, В. А. Приятельчук // Машиноведение. – 1977. – № 2. – С. 97–104.
30. Емельянов А. В. Оптимальные параметры и сравнительные характеристики радиальных подвесов с непрофилированными рабочими поверхностями / А. В. Емельянов, В. А. Приятельчук, А. В. Шевченко // Машиноведение. – 1978. – № 6. – С. 81–89.

31. Емельянов А. В. Метод корректирующих сплайнов и его приложение к теории газовых подвесов / А. В. Емельянов, А. И. Шевчук // Исследование и применение опор скольжения с газовой смазкой : Всесоюзное координационное совещание, 12–14 мая 1983 г. : тезисы докл. – Винница, 1983. – С. 47–48.

32. Емельянов А. В. Расчет методом сплайнов кольцевых подпятников с наддувом газа по коллектору через пористый материал / А. В. Емельянов, А. Н. Денисенко // Газовая смазка в машинах и приборах : Всесозн. коорд. совещ., 18–20 сент. 1989 г. : тезисы докл. – М., 1989. – С. 45–46.

33. Емельянова Н. А. Теория радиально-осевых подвесов с зеркально симметричной геометрией и произвольно ориентированной несоосностью / Н. А. Емельянова, Л. С. Емельянова // Исследование и применение опор скольжения с газовой смазкой : Всесоюзное координационное совещание, 12–14 мая 1983 г. : тезисы докл. – Винница, 1983. – С. 10–11.

34. Емельянова Н. А. Теоретический анализ радиальных газовых подвесов при произвольно ориентированной малой несоосностью / Н. А. Емельянова // Машиноведение. – 1984. – № 6. – С. 89–96.

35. Карпов В. С. Динамические характеристики вертикальных газовых подшипников с профилированной поверхностью вала / В. С. Карпов, О. Н. Тихоненкова // Исследование и применение опор скольжения с газовой смазкой : Всесоюзное координационное совещание, 12–14 мая 1983 г. : тезисы докл. – Винница, 1983. – С. 46–47.

36. Каstellи (V. Castelli). Обзор численных методов решения задач газового подшипника / Каstellи, Пирвикс (J. Pirvics) // Проблемы трения и смазки. – 1968. – № 4. – С. 129–148.

37. Киселев Г. В. Исследование влияния некруглости шипа газостатических подшипников на точность вращения его оси / Г. В. Киселев, В. А. Федотов, Г. Н. Багдасарьян // Подшипниковая промышленность. НИИНАВТОПРОМ. – 1977. – № 8. – С. 19–23.

38. Константинеску В. Н. Газовая смазка / В. Н. Константинеску ; пер. с рум. под ред. Коровчинского М. В. – М. : Машиноведение, 1968. – 718 с.

39. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1973. – 848 с.



40. Лохматов А. А. Применение опор скольжения с газовой смазкой в электроклапане центробежного типа / А. А. Лохматов, Г. Д. Озеров, Г. Г. Агишев // Исследование и применение опор скольжения с газовой смазкой : Всесоюзное координационное совещание, 12–14 мая 1983 г. : тезисы докл. – Винница, 1983. – С. 68–69.
41. Марчук Г. И. Методы в числительной математике / Г. И. Марчук. – М. : Наука, 1977. – 456 с.
42. Павловський М. А. Теоретична механіка : підручник / М. А. Павловський. – К. : Техніка, 2002. – 512 с.
43. Пешти Ю. В. Метод расчета устойчивости вращения роторов турбомашин в подшипниках с газовой смазкой / Ю. В. Пешти // Исследование и применение опор скольжения с газовой смазкой : Всесоюзное координационное совещание, 12–14 мая 1983 г. : тезисы докл. – Винница, 1983. – С. 79–80.
44. Пинегин С. В. Газодинамические подпятники со спиральными канавками / Пинегин С. В., Емельянов А. В., Табачников Ю. Б. ; – М. : Наука, 1977. – 108 с.
45. Пинегин С. В. Статические и динамические характеристики газостатических опор. / С. В. Пинегин, Ю. Б. Табачников, И. Е. Синенков. – М. : Наука, 1982. – 265с.
46. Пинегин С. В. Метод исследования антифрикционных свойств материалов применительно к условиям работ подшипников с газовой смазкой / С. В. Пинегин, В. П. Петров // Исследование и применение опор скольжения с газовой смазкой : Всесоюзное координационное совещание, 12–14 мая 1983 г. : тезисы докл. – Винница, 1983. – С. 72–74.
47. Пинегин С. В. Прецизионные опоры качения и опоры с газовой смазкой. Справочник (Основы проектирования машин) / С. В. Пинегин, А. В. Орлов, Ю. Б. Табачников. – М. : Машиностроение, 1984. – 216 с.
48. Приятельчук В. А. Расчет характеристик газостатических подвесов с учетом сложной несоосности / В. А. Приятельчук // Трение и износ. – 1985. – Т. VI, № 4. – С. 604–611.
49. Приятельчук В. О. Вплив овальності вала на характеристики газових підвісок / В. О. Приятельчук, В. О. Федотов, О. М. Красноштан // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2003. – № 3. – С. 70–75.

50. Ревкач М. В. Розрахунок та оптимізація двосторонньої плоскої пористої прямокутної газостатичної опори великого видовження / М. В. Ревкач, В. І. Степанчук, В. О. Федотов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1994. – № 4 (5). – С. 38–40.

51. РТМ 108. 129. 101. – 76. Расчет радиальных газостатических подшипников турбомашин атомной энергетики / [ Снопов А. И., Лучин Г. А., Данильченко В. Ф. и др.]. – Л. : НПО ЦКТИ, 1977. – 84 с.

52. РТМ 108. 129. 104. – 78. Расчет и проектирование упорных кольцевых газостатических подшипников турбомашин атомной энергетики / [ Снопов А. И., Лучин Г. А., Данильченко В. Ф. и др.]. – Л. : НПО ЦКТИ, 1980. – 167 с.

53. Самарский А. А. Разностные схемы / А. А. Самарский. – М. : Наука, 1977. – 656 с.

54. Самарский А. А. Теория разностных схем для дифференциальных уравнений с обобщенными решениями : учебник / А. А. Самарский, Р. Д. Лазарев, В. Л. Макаров – М. : Высшая школа, 1987. – 296 с.

55. Самсонов А. И. Исследование и проектирование подшипников с наддувом газа для турбомашин / А. И. Самсонов, В. С. Кирсанов, Е. И. Кончаков // Исследование и применение опор скольжения с газовой смазкой : Всесоюзное координационное совещание, 12–14 мая 1983 г. : тезисы докл. – Винница, 1983. – С. 54–55.

56. Селиванов Ю. В. Оптимизация радиальных газостатических опор с щелевым наддувом / Ю. В. Селиванов // Газовая смазка в машинах и приборах : Всесозн. коорд. совещ., 18–20 сент. 1989 г. : тезисы докл. – М., 1989. – С. 73.

57. Сергеев С. И. Динамика криогенных турбомашин с подшипниками скольжения / С. И. Сергеев. – М. : Машиностроение, 1973. – 304 с.

58. Снопов А. И. Расчет динамических характеристик упорных кольцевых газостатических подшипников с дискретным наддувом / А. И. Снопов, В. Ф. Данильченко, А.Н. Иванов // Исследование и применение опор скольжения с газовой смазкой : Всесоюзное координационное совещание, 12–14 мая 1983 г. : тезисы докл. – Винница, 1983. – С. 38–39.

59. Снопов А. И. Расчет динамических характеристик радиальных газостатических подшипников-уплотнений с щелевым наддувом / А. И. Снопов, О. Г. Солопова // Надежность роторных систем с опо-

рами на газовой смазке : школа-семинар, 1–5 окт. 1990 г. : тезисы докл. – М. : 1990. – С. 71.

60. Степанчук В. И. Применение метода сплайнов к расчету газовых подвесов / В. И. Степанчук, В. А. Федотов, А. И. Шевчук // Совершенствование методики преподавания и научные работы по теоретической и прикладной механике в условиях перестройки высшей школы : XIV межвузовский научно-методический семинар, 9–11 июня 1988 г. : тезисы докл. – Хмельницкий, 1988. – С. 101–102.

61. Степанчук В. И. Пути повышения характеристик газовых опор со щелями наддува / В. И. Степанчук, В. А. Федотов, А. А. Кашканов // Применение колебаний в технологиях. Расчет и проектирование машин для реализации технологий : материалы II Междун. науч.-техн. конф., 5–7 сент. 1994 г. – Винница, 1994. – С. 122–123.

62. Степанчук В. И. Лінійний статичний аналіз газостатичних конічних підвісок, профільованих поздовжніми канавками / В. І. Степанчук, В. О. Федотов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1994. – № 3 (4). – С. 57–61.

63. Степанчук В. І. Лінійний динамічний аналіз газостатичних конічних підвісок, профільованих поздовжніми канавками / В. І. Степанчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1995. – № 4. – С. 45–51.

64. Степанчук В. І. Лінійний аналіз явища самозбудження осевих коливань в шпинделях на конічних підвісках, профільованих поздовжніми канавками / В. І. Степанчук, В. О. Федотов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1998. – № 2. – С. 90–92.

65. Табачников Ю. Б. Исследование и оптимизация радиальных газостатических подшипников с продольными канавками с учетом угловой жесткости / Табачников Ю. Б., Шевченко А. В., Степанчук В. И. // Машиноведение. – 1981. – №2. – С.100–107.

66. Федотов В. А. Экспериментальное исследование радиального газового подшипника с двойным дросселированием потока газовой смазки / В. А. Федотов, Г. В. Киселев // НИИНАВТОПРОМ, серия XII, Подшипниковая промышленность. – 1979. – № 8. – С. 11–13.

67. Федотов В. О. Влияние окружных потоков газа в проточных каналах цилиндрического подвеса на его характеристики / В. А. Федотов, А. В. Шевченко, А. В. Молчанов // Изв. Вузов. Машиностроение. – 1980. – № 4. – С. 67–71.

68. Федотов В. А. Расчет газостатических подшипников с продольными канавками в виде выкружек и лысок / В. А. Федотов, А. И. Шевчук // Вестник машиностроения. – 1985. – № 2. – С. 21–23.
69. Федотов В. А. Об улучшении характеристик газовых подвесов с продольными канавками / В. А. Федотов // Газовая смазка в машинах и приборах : Всесозн. коорд. совещ., 18–20 сент. 1989 г. : тезисы докл. – М., 1989. – С. 45–46.
70. Федотов В. О. Вплив активного дроселя на характеристики газових підшипників / В. О. Федотов, А. А. Кашканов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1994. – № 2 (3). – С. 65–67.
71. Федотов В. О. Оптимізація параметрів шпindelьних вузлів на газових конічних підвісках, профільованих поздовжніми канавками / В. О. Федотов, В. І. Степанчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1997. – № 4. – С. 70–75.
72. Федотов В. О. До питання межі застосування методу сплайнів у розрахунках газових підвісів / В. О. Федотов, С. В. Смирнов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2002. – № 6. – С. 85–88.
73. Федотов В. О. Вплив нахилу поздовжніх канавок на характеристики радіальних підвісок / В. О. Федотов, В. В. Савуляк // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2003. – № 1. – С. 54–56.
74. Федотов В. О. Вплив похибок виготовлення газових підвісок на їх характеристики / В. О. Федотов, І. Ю. Нікітіна, В. В. Савуляк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2004. – № 5. – С. 78–84.
75. Федотов В. О. Характеристики конічних газових підвісок поздовжніми канавками змінної глибини / В. О. Федотов, І. В. Федотова // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 2. – С. 76–80.
76. Фурманов Б. А. Динамические характеристики и устойчивость газостатических подпятников со ступенчатым зазором / Б. А. Фурманов // Вестник машиностроения. – 1977. – № 6. – С. 31–34.
77. Хирс. Конструирование опорных подшипников с продольными канавками и внешним нагнетанием смазки / Хирс (G. G. Hirs) // Проблемы трения и смазки. – 1968. – № 4. – С. 324–331.
78. Шевченко А. В. Комплексный подход к проблеме оптимизации газостатических подпятников. / А. В. Шевченко, В. А. Федотов, Г. И. Багдарасян // Машиноведение. – 1981. – №1. – С.115–121.

79. Шевчук А. І. Статичні характеристики кінцевого газового підвісу з поздовжніми канавками при довільних зміщеннях вала / А. І. Шевчук, В. О. Федотов, В. В. Савуляк // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2002. – № 4. – С. 107–114.

80. Шейнберг С. А. Опоры скольжения с газовой смазкой / С. А. Шейнберг, В. П. Жедь, М. Д. Шишеев. – М. : Машиностроение, 1969. – 331 с.

81. Шейнберг С. А. Оптимизация циркулярного аэростатического подшипника / С. А. Шейнберг, В. П. Жедь // Вестник машиностроения. – 1976. – № 21. – С. 12–18.

82. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг ; пер. с немец. Г. А. Вольперта. – М. : Гл. ред. ф.-м. лит. изд. Наука, 1974. – 390 с.

83. Шнайдер А. Г. Статические характеристики конического газового смазочного слоя радиально-упорных мотор-подшипников и повышение их экономичности по расходу газа / А. Г. Шнайдер, В. И. Степанчук // Трение и износ. – 1992. – Т. 13, – № 3. – С. 431–437.

84. Шнайдер А. Г. Расчет статической реакции газового слоя в радиально-упорных мотор-подшипниках с целью наддува газа / А. Г. Шнайдер, В. И. Степанчук // Вестник машиностроения. – 1991. – № 12. – С. 27–29.

85. Шустер В. Г. Точность движения шипа в аэростатическом подвесе / В. Г. Шустер // Исследование и применение опор скольжения с газовой смазкой : Всесоюзное координационное совещание, 12–14 мая 1983 г. : тезисы докл. – Винница, 1983. – С. 36–37.

86. Яковлев В. И. Расчет конического подшипника с двумя питающими щелями / В. И. Яковлев, Ю. П. Циманский, Т. С. Яковлева // Вестник машиностроения. – 1987. – № 7. – С. 17–18.

87. Blondeen E. Externally pressurized bearing with pressure dependent restrictors / E. Blondeen, R. Snoyes // Proc. 6-th Intern. Gas Bearing Symp., Southampton. – 1974 – P. D2/19–D2/42.

88. Chandra M. Gas bearings. Part 1: Dynamic analysis and solution method / M. Chandra, M. Malik, R. Sinhasan // Wear. – 1983. – Vol. 88, – №3. – P. 255–268.

89. Grewal S. S. On the inherent compensation in an air journal bearing. / S. S. Grewal // Proc. Inst. Mech. Eng. – 1983. – Vol. C197, Dec. – P. 275–276.

90. Gross W. A. Gas Film Lubrication / W. A. Gross. – Wiley, New York, N. Y., 1962. – 414 p.
91. Gross W. A. Investigation of whirl in externally pressurized air lubricated journal bearings / W. A. Gross // Trans. ASME. – 1962. – Vol. 84, – №1. – P. 132–138.
92. Gunter E. I. The effects of speed, load and fulm thickness on the performance of gas-lubricated, tilting – pad journal bearings / E. I. Gunter, I. G. Hinkle, D. D. Fuller // Trans. ASLE. – 1964. – №7. P. 353–365.
93. Haruyama Y. Influence of gas inertia forces generated within the stabilizing restrictor on dynamic characteristics of externally pressurized thrust gas bearings. 1-st report. Case of laminar flow at the capillary restriction / Y. Haruyama, H. Mori // Bull. JSME. – 1982. Vol. 25, – №210. – P. 2030–2038.
94. Jeffreys J. G. Air bearings and the engineering of movement / J. G. Jeffreys // Eng. Dig. – 1985. – Vol. 31, – №2. – P. 16–18.
95. Lee A. L. Design and testing of a hydrostatic air bearing / A. L. Lee // AIAA Pap. – 1987. №296. – P. 1–5.
96. Licht L. A study of the stability of externally pressurized gas bearings / L. Licht, H. G. Elrod // Trans. ASME. – 1960. – Vol. 82, – №2. – P. 250–258.
97. Majumdar B. C. Externally pressurized gas bearings / B. C. Majumdar // Wear. – 1980. – Vol. 62, №2. – P. 299–314.
98. Mori A. Modified Reynolds equations and boundary conditions for analyses of dynamic performances of externally pressurized gas bearings / A. Mori, H. Mori // Pap. Pres. 8-th Intern. Gas Bearing Symp., Leicester – 1981. – P. 217–228.
99. Mori A. Effect of excentricity on whirl instability in externally inherently compensated gas journal bearings / A. Mori, H. Mori // Proc. 7–th Intern. Gas Bearing Symp., Southampton. – 1976. – P. A6/83–A6/95.
100. Mori H. A theoretical investigation of pressure depression in externally pressurized gas-lubricated circular thrust bearings / H. Mori // Trans. ASME. – 1967. – Vol. 83, – №2. – P. 201–208.
101. Pink E. G. The application of complex potential theory to externally pressurized gas-lubricated bearings / E. G. Pink // Pap. Pres. 8–th Intern. Gas Bearing Symp., Leicester – 1981. – P. 251–266.

102. Pink E. G. Characteristics of orifice compensated hybrid journal bearings / E. G. Pink, K. Y. Stout // Pap. Pres. 8-th Intern. Gas Bearing Symp., Leicester – 1981. – P. 29–44.
103. Scowen G. D. The design of externally pressurized gas-lubricated thrust bearings for stability / G. D. Scowen // Proc. 6-th Intern. Gas Bearing Symp., Southampton – 1974. – P. A2/9–A2/32.
104. Srinivasan K. Analysis of externally pressurized gas-lubricated conical bearings / K. Srinivasan, B. S. Prabhu // Wear. – 1983. – Vol. 86, – №2. – P. 201–212.
105. Stout K. J. Design of aerostatic flat pad bearings using pocketed orifice restrictors / K. J. Stout, F. Sweeney // Tribol. Ins. – 1984. – Vol. 17, №4. – P. 137–145.
106. Yoshimoto S. Static characteristics of a Slot-Entry Gas Journal Bearing with Feeding Holes / S. Yoshimoto // Trans. ASME, Ser. F, J. Tribology. – 1988. – V.110, – №4. – P. 587–591.

*Наукове видання*

**Федотов Валерій Олександрович  
Федотова Інна Вікторівна**

## **ГАЗОВІ ПІДВІСИ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено І. Федотовою

Підписано до друку 17.05.2010 р.

Формат 29,7×42¼ Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman.

Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 14,15

Наклад 100 прим. Зам № 2010-088

Вінницький національний технічний університет,  
КІВЦ ВНТУ,

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.

Тел. (0432) 59-85-32

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,  
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.

Тел. (0432) 59-81-59

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.