

В. О. Федотов, І. В. Федотова

ГАЗОВІ ПІДВІСИ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ



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. – 245 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 щілиною наддування газу.....	23
1.3.3 Дослідження узагальненої осьового газового підвісу з щілиною 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 Шпindelльні 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
A3 Осьовий підвіс з зовнішнім дроселем та однією відкритою	

гранцею.....	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 шпindelних вузлів на конічних газових підвісах з поздовжніми канавками.....	229

ВИСНОВКИ

В роботі досліджуються та оптимізуються конструктивні параметри осьових, радіальних та конічних підвісів з метою поліпшення їх характеристик. Газові підвіси, на відміну від газодинамічних, працюють при малих числах Кнудсена і мають невеликі значення параметра стискання [44] навіть при значних величинах кутової швидкості вала шпindelного вузла. І тому отримані результати дослідження і розрахунків газових підвісів різного типу, в більшості практичних випадків використовуються для проектування шпindelних вузлів з кутовою швидкістю вала до 10000 c^{-1} .

Основні результати досліджень

1. Вплив конструктивних параметрів осьових газових підвісів на їх характеристики (піднімальна сила, жорсткість, витрати газу) досліджено на підставі узагальненої моделі, в якій внутрішнє дроселювання газу відбувається за рахунок східчастої форми робочого зазору, а змінне зовнішнє – за рахунок конічної щілини наддування газу. Проведено дослідження газових осьових підвісів різного типу при оптимальних конструктивних

параметрах з метою виявлення їх переваг та недоліків. Доведено, що узагальнена модель осьового газового підвісу має найвищі інтегральні характеристики в порівнянні із іншими типами газових осьових підвісів.

В додатку А наведені формули для розрахунку характеристик газових осьових підвісів шести конструкцій і результати оптимізації за запропонованими критеріями конструктивних параметрів цих конструкцій.

2. На підставі рівняння Рейнольда, отримано інтегральні характеристики (радіальна піднімальна сила, відновний момент газового шару при кутових переміщеннях вала, радіальна та кутова жорсткість, витрати газу) узагальненого радіального газового підвісу в якому внутрішнє дроселювання газу здійснюється за рахунок глухих поздовжніх канавок прямокутного поперечного профілю, а зовнішнє – щілиною наддування газу. Проведено дослідження узагальненого радіального газового підвісу і його окремих випадків – радіального підвісу з поздовжніми канавками, газового підвісу Адама, радіального газового підвісу з щілиною наддування газу та східчастим робочим зазором, радіального газового підвісу з щілиною наддування газу показали, що узагальнений радіальний підвіс та підвіс з поздовжніми канавками має ряд переваг у порівнянні з іншими типами радіальних підвісів.

На прикладі газового підвісу з щілиною наддування газу досліджено вплив кутової швидкості вала на характеристики підвісу. Розрахунки показали, що із збільшенням кутової швидкості вала, піднімальна сила підвісу дещо зростає, розширюється діапазон лінійності піднімальної сили від радіального зміщення вала і зменшуються витрати газу.

Доведено, що для поліпшення характеристик радіальних газових підвісів необхідно зменшити вплив шкідливих колових перетікань газу в робочому зазорі. Це досягається зменшенням відношення гідравлічного опору течії газу в осьовому та коловому напрямках і використанням активного зовнішнього дроселювання газу (щілини наддування газу, ширина якої змінюється в залежності від робочого зазору підвісу).

Результати оптимального проектування конструктивних параметрів радіальних газових підвісів шести різних конструкцій та відповідні їм інтегральні характеристики наведені в додатку Б.

3. Методом сплайнів, досліджено конічні газові підвіси з поздовжніми канавками при довільних зміщеннях вала. Розрахунки показали, що при оптимальних конструктивних параметрах конічні газові підвіси статично стійкі і впливом кутових переміщень вала на радіальну піднімальну силу та радіальних переміщень на відновний момент можна нехтувати при інженерних розрахунках газових конічних підвісів.

Поліпшення характеристик конічних підвісів можна досягти, якщо поздовжні канавки виконувати змінної глибини та ширини. Так підвіси з поздовжніми канавками, глибина яких зменшується по ходу течії газу, мають більшу радіальну піднімальну силу та жорсткість у порівнянні з підвісами у яких глибина поздовжніх канавок стала. Це досягається без збільшення витрат стиснутого газу.

Статичні характеристики та відповідні їм оптимальні конструктивні параметри конічного газового підвісу з поздовжніми канавками сталої глибини та ширини наведені в додатку В.

4. Відхилення вала від циліндричності у вигляді огранки не впливає на точність обертання вала і незначно підвищує інтегральні характеристики підвісів. Овальність вала в незначній мірі приводить до зменшення піднімальної сили радіальних підвісів і биття осі (поверхні) вала. Внаслідок усереднювального ефекту газового шару, биття вала від трьох до сорока разів менше ніж відхилення вала від циліндричності в залежності від типу підвісу та його відносної довжини.

При оптимальних конструктивних параметрах найбільший негативний вплив на жорсткість радіального підвісу з щілиною наддування газу мають похибки поздовжнього профілю у вигляді сідлоподібності та конусності вала. Нерівномірність ширини кільцевої щілини наддування газу не впливає на безрозмірну жорсткість підвісу та витрати газу, але зменшує піднімальну силу опори в деяких напрямках та її надійність, оскільки при відсутності навантаження, вал зміщується із співвісного з втулкою положення.

5. Проведено класифікацію та аналіз шпindelьних вузлів за типом геометричної конфігурації робочих поверхонь підвісів, зовнішніх дроселюючих пристроїв та типом профілювання робочих поверхонь. Розглянуті методики визначення інтегральних характеристик та відповідних їм конструктивних параметрів шпindelьних вузлів з однією та двома радіальними або конічними підвісами. Для шпindelьних вузлів на конічних підвісах з поздовжніми канавками проведено оптимізацію їх конструктивних параметрів за критерієм максимального значення відношення безрозмірної радіальної жорсткості до безрозмірних витрат газу та добутку безрозмірної радіальної і кутової жорсткості до безрозмірних витрат газу. Результати оптимізації наведені в додатку Г.

На підставі аналізу явища самозбудження осьових коливань в шпindelьних вузлах на двох конічних підвісах з поздовжніми канавками можна зробити висновок, що небезпеку виникнення осьової нестійкості та самозбудження можна повністю усунути оптимізацією конструктивних параметрів підвісів.

Спроектвані, виготовлені та впроваджені у виробництво шпindelні вузли на циліндричних газових підвісах, конічних газових підвісах з поздовжніми канавками технологічні в виготовленні, прості в обслуговуванні, надійні в роботі і мають стабільні експлуатаційні параметри.

ЛІТЕРАТУРА

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 (C. 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 аэроэластических 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. Емельяев 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 : Всесоюз. 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. Кастелли (V. Castelli). Обзор численных методов решения задач газового подшипника / Кастелли, 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 электроventильаторе 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 математики / 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 опорами 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. І. Лінійний статичний аналіз газостатичних кінцевих 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 осьових 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 шпиндельних 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, Є. 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. Багдарасьян // Машиноведение. – 1981. – №1. – С.115–121.

79. Шевчук А. І. Статичні характеристики конічного 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 аэро-статического 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 аэро-статическом 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 film 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.