

УДК 621.9.06

Н.Т. Зубовецька, Р.М. Полінкевич, Р.Г. Редько, Р.А. Склярів
ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ДЕМПФУВАННЯ В ШАРАХ МАЩЕННЯ
ГАЗО-ГІДРАВЛІЧНИХ ІНЕРЦІЙНИХ ПІДШИПНИКІВ

В статті наведено результати теоретичного дослідження походження затухання в газо-гідралічних інерційних підшипниках (ГГП). Встановлено, що газо-гідралічне мащення має властивості самоналаштування параметрів при виникненні коливань в сторону їх зменшення. Демпфувальна здатність в шарах мащення ГГП суттєво залежить від в'язкості рідинного шару, величини ексцентриситету і параметру швидкохідності.

Ключові слова: підшипники, високошвидкісні ротори, газ, рідина, системи ротора, мащення.
Форм. 7. Рис. 4. Літ. 6.

Н.Т. Зубовецкая, Р.М. Полинкевич, Р.Г. Редько, Р.А. Склярів
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ДЕМПФИРОВАНИЯ В СЛОЯХ
СМАЗКИ ГАЗО-ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИНЕРЦИОННЫХ ПОДШИПНИКОВ

В статье изложены результаты теоретического исследования происхождения затухания в газо-гидравлических инерционных подшипниках (ГГИП). Установлено, что газо-гидравлическая смазка имеет возможность самонастраиваться при возникновении колебаний в сторону их преодоления. Демпфирующая способность в слоях смазки ГГИП существенно зависит от вязкости жидкого слоя, величины эксцентриситета и параметра быстроходности.

Ключевые слова: подшипники, высокоскоростные роторы, газовые, гидравлические, системы ротора, смазка.

N. Zubovetska R. Polinkevich, R. Redko, R. Sklyarov
THEORETICAL RESEARCH OF THE MECHANISM DAMPING IN LAYERS OF GAS-
HYDRAULIC INERTIAL BEARINGS

The article sets out the results of a theoretical research origins of damping in the gas-hydraulic inertial bearings (GHIB) It is set that the gas-liquid greasing is characteristics of tuning of parameters of painting in case of occurring of vibrations in the side of their overcoming. Antivibration ability in the layers of painting of GHIB substantially depends from viscosity of liquid layer, sizes of eccentricity and to the parameter of high-speedness.

Keywords: bearing, high speed rotors, gas, hydraulic, rotor system, viscosity.

Вступ. Розвиток технологій, що спостерігається в останній час, з використанням високошвидкісних роторних систем (ВШРС) таких як: високошвидкісна обробка на верстатах, ультрацентрифугування, гіроскопи, транспортні і енергетичні турбіни та ін., вимагає необхідність конструювання ВШРС на новому, високому технологічному рівні.

ВШРС під час роботи мають сприймати динамічні навантаження без порушення точності і втрати працездатності. В той же час саме ротор може бути джерелом дисбалансу, нерівномірної жорсткості та ін.

Динамічна якість ВШРС визначається в першу чергу статичною жорсткістю і демпфувальною здатністю підшипників. Ці характеристики лежать в основі визначення таких важливих показників, як динамічна жорсткість, АФЧХ, декременти затухання, вібростійкості і амплітуд власних та вимушених коливань. У зв'язку із значними динамічними навантаженнями, які виникають опорах високошвидкісних роторів, важливе значення має забезпечення достатнього демпфування в підшипникових опорах роторів ще на стадії проектування.

Постановка проблеми. Нові за конструкцією і принципом дії газогідравлічні інерційні підшипники (ГГП) призначені саме для використання в якості опор роторів ВШРС [1]. ГГП одночасно володіє властивостями гідро- і газодинамічних підшипників, тому в основу математичної моделі можуть бути покладені елементи теорії гідро- і газодинамічного мащення, прикладні задачі, які розглянуті в роботах Л.І. Седова [2], С.А. Шейнберга [3] і багатьох інших дослідників. Проте, особливості двохфазного робочого середовища (рідина і газ) цих підшипників вимагають застосування й специфічної математичної моделі для оцінки демпфувальної здатності ГГП. У двохфазному шарі мащення трапляється взаємодія рухомих молекул рідини і газу за високих швидкостей, що кардинально змінює картину течії. Для побудови математичної моделі цього процесу необхідно визначити механізми створення ефектів динамічної жорсткості і зокрема демпфування в шарах мащення ГГП. В попередніх роботах [4, 5] були проведені дослідження конструктивних особливостей, режимів роботи, статичних і енергетичних характеристик ГГП. В даній роботі досліджується механізм виникнення і розподілу сил в'язкого тертя в шарах мащення.

Основний зміст. Демпфування в ГГП відбувається за рахунок в'язкої сили демпфування, яка пропорційна швидкості руху \dot{r}_g втулки в радіальному напрямку по координаті r (рис. 1):

$$F = \chi \cdot \dot{r}_g, \quad (1)$$

де χ – коефіцієнт в'язкого тертя [6].

При цьому енергія, яка втрачається при цьому русі, розсіюється у вигляді тепла в шарах газу і рідини.

Розглянемо математичну модель демпфування коливань в змащувальному шарі ГГП. В стаціонарному режимі втрати потужності на тертя [1] при зміщеннях ε_g і $\varepsilon_g + \Delta\varepsilon_g$ відповідно дорівнюють:

$$N_{TPg}(\varepsilon_g) = \frac{4\pi \cdot 10^{-3} \mu_g(T) V_{C\varepsilon_g}^2}{H_g} \cdot R_B \cdot L, \text{ Вт}; \quad (2)$$

$$N_{TPh}(\varepsilon_g) = \frac{4\pi \cdot 10^{-3} \mu_h(T) \left[0,5 \cdot 10^{-4} (dn) - V_{C\varepsilon_g} \right]^2}{H_h} \cdot R_B \cdot L, \text{ Вт}; \quad (3)$$

$$N_{TPg}(\varepsilon_g + \Delta\varepsilon_g) = \frac{4\pi \cdot 10^{-3} \mu_g(T) V_{C(\varepsilon_g + \Delta\varepsilon_g)}^2}{H_g} \cdot R_B \cdot L, \text{ Вт}; \quad (4)$$

$$N_{TPh}(\varepsilon_g + \Delta\varepsilon_g) = \frac{4\pi \cdot 10^{-3} \mu_h(T) \left[0,5 \cdot 10^{-4} (dn) - V_{C(\varepsilon_g + \Delta\varepsilon_g)} \right]^2}{H_h} \cdot R_B \cdot L, \text{ Вт}. \quad (5)$$

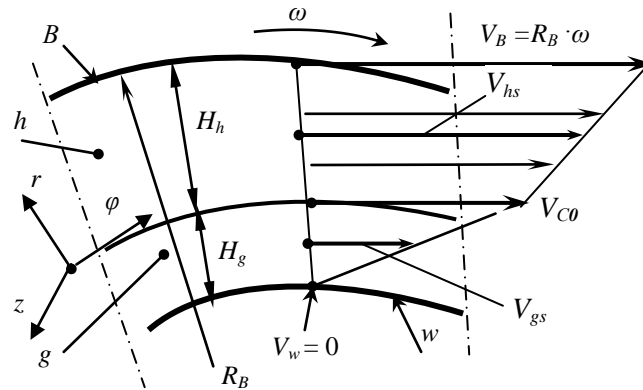


Рис. 1. Схема змащувального шару ГГП

Оскільки розглядається дозвукова течія в газовому шарі, то швидкість деформації в ньому більша, ніж швидкість зміщення \dot{r}_g . Тому приймемо припущення в тому, що розсіяння енергії на тертя в шарі рідини g (див. рис. 1) відбувається миттєво. Тоді при зміщенні на величину $\Delta\varepsilon_g$ розсіяння енергії з формул (2) і (3) дорівнює за будь-якої швидкості \dot{r}_g :

$$\Delta N_{TPg}(\varepsilon_g) = N_{TPg}(\varepsilon_g + \Delta\varepsilon_g) - N_{TPg}(\varepsilon_g) = \frac{4\pi \cdot 10^{-3} \mu_g(T) \left[V_{C(\varepsilon_g + \Delta\varepsilon_g)}^2 - V_{C\varepsilon_g}^2 \right]}{H_g} R_B L. \quad (6)$$

$$\text{де } \alpha_0 - \text{параметр гальмування [5];} \quad V_{C\varepsilon_g} = V_C \frac{1 + \alpha_0}{\frac{\alpha_0}{\sqrt{1 - \varepsilon_g}} + 1}$$

Розсіювання енергії тертя в газовому шарі h відбувається не миттєво за рахунок більшої інерційності рідини і більших напруг зсуву, тобто епюра швидкостей V_h деформується поступово

з форми, яка відповідає зміщенню ε_g , до форми з $\Delta\varepsilon_g$. За малих зміщень ε_g і відсутності деформації рідинного шару вважаємо, що тангенціальні сили інерції є незначними, а сили в'язкості навпаки враховуємо. При цьому вважаємо:

$$\frac{dU_\varphi}{dt} = 0; \frac{\partial p}{r\partial\varphi} = 0; U_r = 0.$$

Тоді система рівнянь Нав'є-Стокса з врахуванням оцінки мізерності її членів і прискоренні U_φ по координаті r набуває вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial r} = -\rho \frac{U_\varphi^2}{r}; \\ \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial U_\varphi}{\partial r} - \frac{U_\varphi}{r^2} \right) - \rho U_\varphi \frac{\partial U_\varphi}{\partial r} = \frac{\partial U_\varphi}{\partial t}. \end{cases} \quad (7)$$

Система (7) розпадається на 2 незалежних рівняння, але друге рівняння є неоднорідним і його аналітично отримати важко. Тому оцінимо внесок інерційних сил у порівнянні з в'язкими. Якщо рахувати, що зміна форми епюри швидкостей V_h відбувається за час $t = H_g \Delta\varepsilon_g / \dot{r}_g$, за який відбувається зміщення $\Delta\varepsilon_g$, то сила демпфування в шарі від дії лише в'язких сил рівна:

$$F_{h\mu} = \frac{\Delta N_{TPg}(\varepsilon_g)}{\dot{r}_g} = \frac{\Delta N_{TPg}(\varepsilon_g)}{H_g \Delta\varepsilon_g} \cdot t, \quad (8)$$

Інерційну складову визначимо, порівнявши імпульс сили інерції F_{hp} за час t до приросту кількості руху частинок рідини.

Кількості руху елементарного шару рідини товщиною $d\rho$ на відстані від поверхні розподілу шарів (див. рис. 3.9) при зміщенні ε_g :

$$\left[dm \cdot V_h(\rho) \right]_{\varepsilon_g} = 2\pi \cdot 10^{-3} L \rho_h \left[V_{C\varepsilon_g} - \frac{0,5 \cdot 10^{-4} (dn) - V_{C\varepsilon_g}}{H_h} \right] d\rho.$$

Теж при зміщенні $\varepsilon_g + \Delta\varepsilon_g$:

$$\left[dm \cdot V_h(\rho) \right]_{\varepsilon_g + \Delta\varepsilon_g} = 2\pi \cdot 10^{-3} L \rho_h \left[V_{C(\varepsilon_g + \Delta\varepsilon_g)} - \frac{0,5 \cdot 10^{-4} (dn) - V_{C(\varepsilon_g + \Delta\varepsilon_g)}}{H_h} \right] d\rho.$$

Інтегруванням різності кількостей рухів по $d\rho$ від 0 до H_h отримаємо вираз для імпульсу сили:

$$\int_0^{H_h} \left\{ \left[dm \cdot V_h(\rho) \right]_{\varepsilon_g + \Delta\varepsilon_g} - \left[dm \cdot V_h(\rho) \right]_{\varepsilon_g} \right\} d\rho = F_{hp} \cdot t.$$

Виконуючи інтегрування і враховуючи вираз для $\Delta N_{TPg}(\varepsilon_g)$ з (3.55), отримуємо:

$$\frac{\pi \cdot 10^{-6} \dot{r}_g L \rho_h H_h \left[V_{C(\varepsilon_g + \Delta\varepsilon_g)} - V_{C\varepsilon_g} \right]}{H_g \Delta\varepsilon_g} = F_{hp}.$$

Знайдемо відношення:

$$\bar{F}_h = \frac{F_{hp}}{F_{h\mu}} = \frac{2\dot{r}_g^2 \pi \cdot 10^{-6} L \rho_h H_h \left[V_{C(\varepsilon_g + \Delta\varepsilon_g)} - V_{C\varepsilon_g} \right]}{\Delta N_{TPh}(\varepsilon_g) H_g \Delta\varepsilon_g},$$

де $\Delta N_{TPh}(\varepsilon_g)$ з формул (2) і (3).

Виразимо швидкість зміщення \dot{r}_g через параметри підшипника:

$$\dot{r}_g = \frac{\pi \cdot 10^{-3} (dn) H_g \Delta\varepsilon_g}{30d}. \quad (9)$$

На рис. 2 наведені залежності \bar{F}_h (7) від параметру швидкохідності для $d=30$ мм і $L = 60$ мм при $H_h = 0,02; 0,04; 0,06; 0,08$ мм. Змащувальне середовище: повітря + гас (рис. 2,а) і повітря + мастило турбінне Т₅₇ (рис. 2, б).

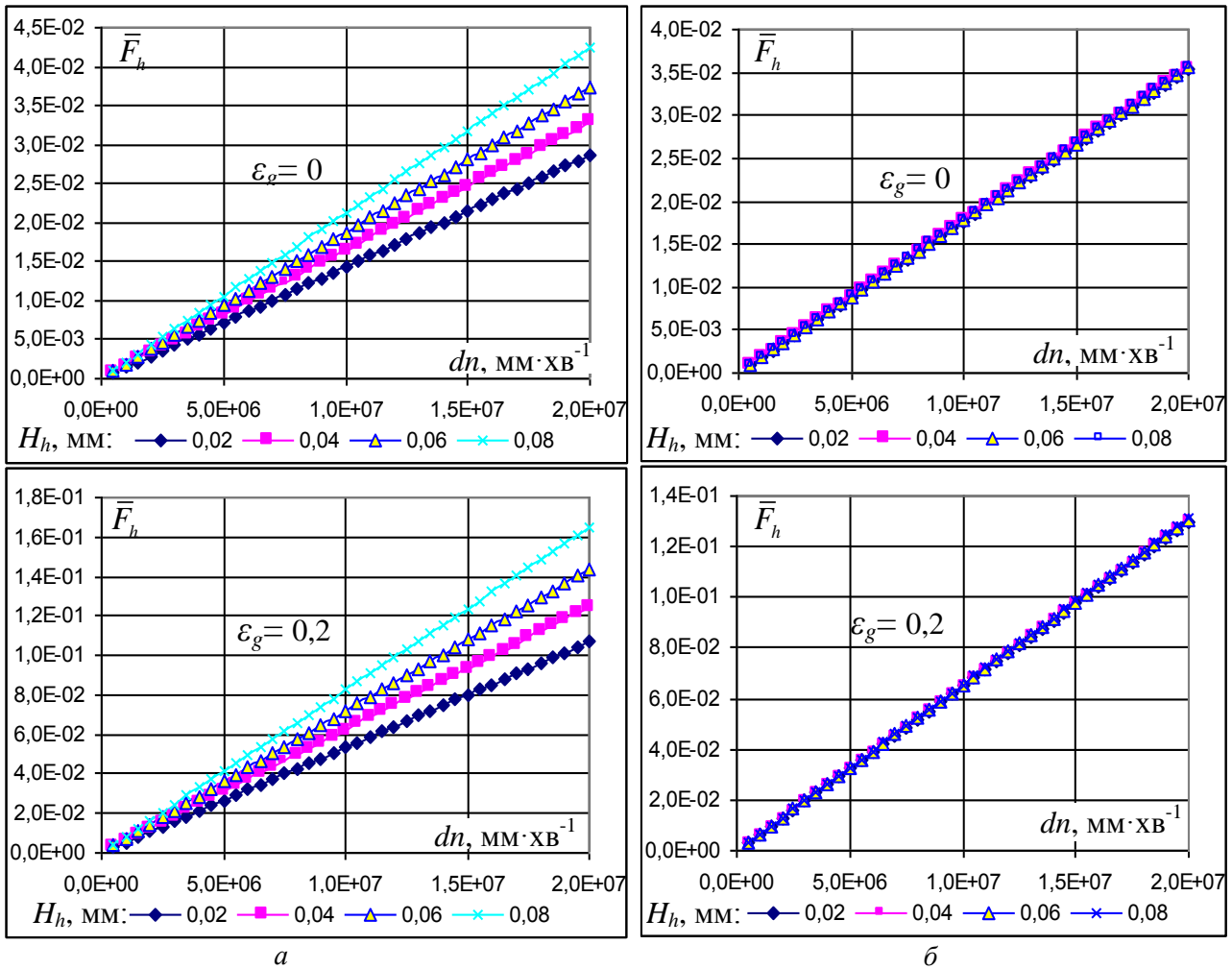


Рис. 2 Залежності \bar{F}_h (3.58) від параметру швидкохідності dn для $L=30$ мм і $d = 60$ мм при $H_h = 0,02; 0,04; 0,06; 0,08$ мм і відносних зміщеннях $\epsilon_g = 0; 0,2$. Змащувальне середовище: повітря + гас (а) і повітря + мастило турбінне Т₅₇ (б)

Із залежностей \bar{F}_h на рис. 2 бачимо, що при малих зміщеннях (до $\epsilon_g = 0,2$) і швидкохідності $dn < 10^7$ мм·хв⁻¹ вага інерційної складової при демпфуванні в шарі рідини не перевищує 6%. При цьому вона зростає при збільшенні ϵ_g і незначно зменшується при використанні більш в'язкої і густої рідини (мастило Т₅₇). Товщина шару рідини помітно впливає при використанні мало в'язкої рідини (гас), при цьому при зменшенні H_h вага інерційних сил також зменшується.

Максимальне демпфування в шарі рідини має місце при малих ексцентриситетах $\epsilon_g = 0,1 \dots 0,2$ і є суттєво нелінійним. Розрахунки демпфувальної здатності змащувального шару ГГП без врахування інерційної складової слід рахувати заниженими на 2...6 %.

З врахуванням останнього силу демпфування в шарі h можна записати формулами (6) і (8) для в'язкого демпфування у вигляді:

$$F_{h\mu} = \frac{\Delta N_{TPg}(\epsilon_g)}{\dot{r}_g} = \frac{4\pi \cdot 10^{-3} \mu_g(T) \left[V_{C(\epsilon_g + \Delta\epsilon_g)}^2 - V_{C\epsilon_g}^2 \right]}{H_g \dot{r}} R_B L. \quad (10)$$

Враховуючи (1), коефіцієнт в'язкого тертя в шарі рідини:

$$\chi_h(\epsilon_g) \approx \frac{4\pi \cdot 10^{-3} \mu_g(T) \left[V_{C(\epsilon_g + \Delta\epsilon_g)}^2 - V_{C\epsilon_g}^2 \right] R_B L}{H_g}. \quad (11)$$

На рис. 3 представлені залежності χ_h (11) від товщини H_h шару рідини при зміщеннях $\varepsilon_g = 0,0 \dots 0,6$ і параметрі швидкохідності $dn = 10^7 \text{ мм} \cdot \text{хв}^{-1}$ для $L=30 \text{ мм}$ і $d = 60 \text{ мм}$. Для в'язкої рідини (T_{57}) залежність в діапазоні $H_h = 0,2 \dots 1,0 \text{ мм}$ є лінійною, але демпфувальна здатність в цілому нижча, ніж для гасу. Підвищення демпфувальної здатності ГПП при збільшенні товщини шару H_h і ексцентриситету ε_g супроводжується зменшенням сумарної статичної жорсткості обох шарів, яка залишається при цьому достатньо високою. При цьому χ_h не залежить від параметру швидкохідності (dn). Отже газорідинне змащування має властивості самонастроювання параметрів мащення при виникненні вібрацій в бік їх подолання.

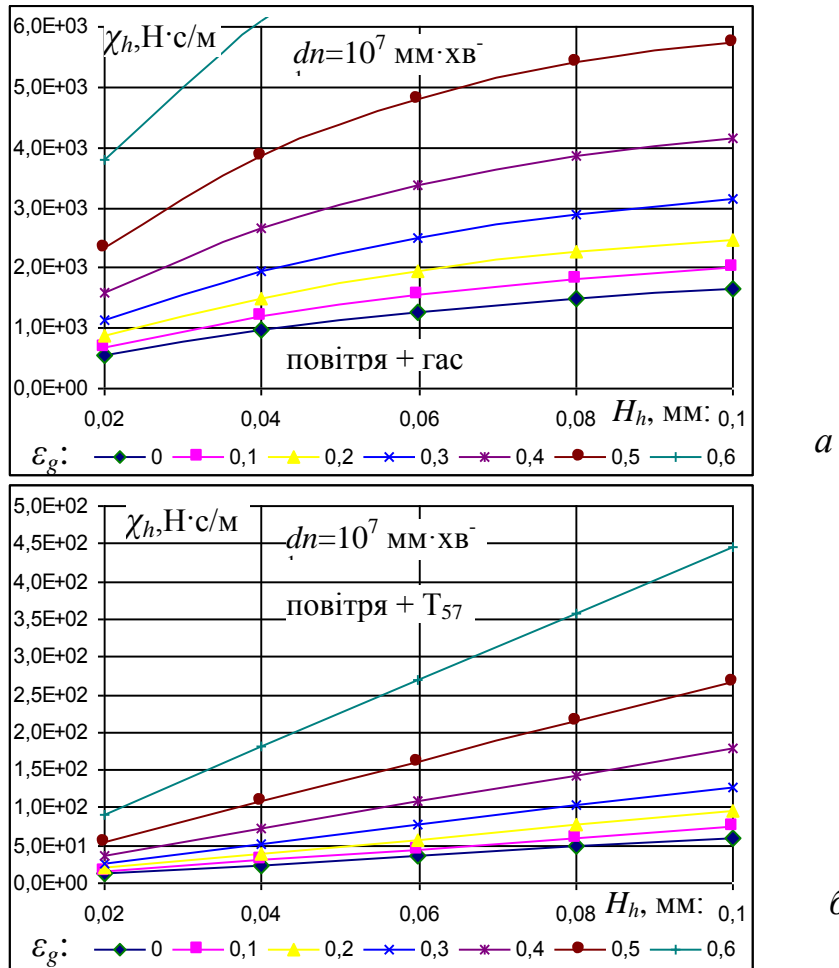


Рис. 3. Залежності χ_h (11) від товщини H_h шару рідини при зміщеннях $\varepsilon_g = 0,0 \dots 0,6$ і параметрі швидкохідності $dn = 10^7 \text{ мм} \cdot \text{хв}^{-1}$ для $L=30 \text{ мм}$ і $d = 60 \text{ мм}$. Змащувальне середовище: повітря + гас (а) і повітря + мастило турбінне T_{57} (б)

Розглянемо характеристику демпфування в газовому шарі g (див. рис.1). Сила демпфування в газовому шарі g визначається з врахуванням (6):

$$F_g = \frac{\Delta N_{TPg}(\varepsilon_g)}{\dot{r}_g} = \frac{4\pi \cdot 10^{-3} \mu_g(T) \left[V_{C(\varepsilon_g + \Delta\varepsilon_g)}^2 - V_{C\varepsilon_g}^2 \right]}{H_g \dot{r}_g} R_B L, \text{ Н.} \quad (12)$$

а коефіцієнт в'язкого тертя за формулою:

$$\chi_g = \frac{4\pi \cdot 10^{-3} \mu_g(T) \left[V_{C(\varepsilon_g + \Delta\varepsilon_g)}^2 - V_{C\varepsilon_g}^2 \right]}{H_g} R_B L, \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м.} \quad (13)$$

На рис. 4 надані залежності χ_g (13) від товщини H_h шару газу при зміщеннях $\varepsilon_g = 0,0 \dots 0,6$ і параметрі швидкохідності $dn = 10^7 \text{ мм} \cdot \text{хв}^{-1}$ для $L=30 \text{ мм}$ і $d = 60 \text{ мм}$.

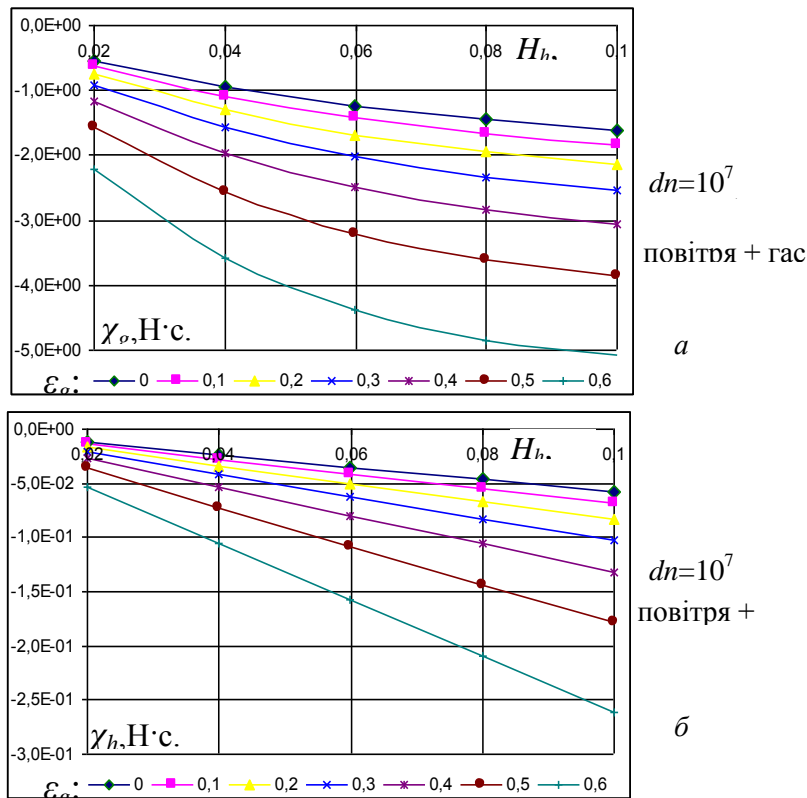


Рис. 4. Залежності χ_g (13) від товщини H_h шару рідини при зміщеннях $\varepsilon_g = 0,0 \dots 0,6$ і параметрі швидкохідності $dn = 10^7$ мм·хв⁻¹ для $L=30$ мм і $d = 60$ мм. Змащувальне середовище: повітря + газ (а) і повітря + мастило турбінне Т₅₇ (б)

З графіків $\chi_g(H_h)$ (рис. 4) бачимо, що коефіцієнт в'язкого тертя в шарі газу має від'ємну величину, яка зменшується, як при збільшенні товщини шару H_h , так і при збільшенні відносного ексцентриситету ε_g , тобто демпфувальна здатність газового шару за цих умов зменшується.

Якщо порівняти коефіцієнт в'язкого тертя в шарі газу χ_g (рис. 4) і в шарі рідини χ_h (рис. 3), то можна констатувати, що $|\chi_h| \gg |\chi_g|$ - приблизно на 3...4 порядки. Від'ємні значення χ_g вказують на те, що при зміщенні ε_g трапляється визволення енергії тертя в шарі газу за рахунок гальмування на межі розподілу шарів g і h (див. рис. 1). При тому при збільшенні ε_g демпфувальна здатність шару зменшується. Отже χ_g також залежить від (dn).

Висновки. Проведений теоретичний аналіз механізму демпфування в ГГП показав наступне:

1. Демпфувальна здатність в шарах мащення ГГП суттєво залежить від в'язкості рідинного шару, величини ексцентриситету і параметру швидкохідності.
2. Демпфування в основному відбувається в рідинному шарі, при цьому $|\chi_h| \gg |\chi_g|$ - приблизно на 3...4 порядки.
3. Газорідинне змащування має властивості самонастроювання параметрів мащення при виникненні вібрацій в бік їх подолання.

1. Зубовецька Н.Т. Навантажувальна здатність і енергетичні характеристики високошвидкісних радіальних газо-гідрравлічних інерційних підшипників: дисертація кандидата технічних наук: 26.05.10 / Зубовецька Наталія Тарасівна. – Луцьк, 190 с.
2. Седов Л.И. Механика сплошной среды: в 2 т. Т.1. / Л.И. Седов – М.: Наука, 1973. – 536 с.
3. Шейнберг С.А. Опоры скольжения с газовой смазкой / С.А. Шейнберг, В.П. Жедь, М.Д. Шишеев. – М.: Машиностроение, 1969. – 336 с.
4. Зубовецька Н.Т. Динамічні характеристики високошвидкісного роторного газо-гідрравлічного інерційного підшипника / Н.Т. Зубовецька // Машинознавство. - 2008. - №4. – С. 42-47.
5. Захаров П.О. Теоретичне обґрунтування вибору основних параметрів модельного газогідравлічного інерційного підшипника / П.О. Захаров, Н.Т. Зубовецька, В.І. Шваб'юк // Машинознавство. – 2002. – №11(65). – С. 33-36.
6. Детали и механизмы металлорежущих станков / [под. ред. Решетова Д.Н.]. – М.: Машиностроение, 1972. – т.2. – 520с.

Стаття надійшла до редакції 25.04.2016.