

НАУКОВІ І ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ СТРУМЕНЕВОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ В ЩІЛИНІ СФЕРИЧНОЇ ГІДРОСТАТИЧНОЇ ОПОРИ

В статье рассмотрены сферические гидростатические опоры со струйным регулированием положения сферы. На основе метода ламинарной аналогии исследованы параметры вязкого течения жидкости в щели сферической опоры при струйном регулировании. Определены векторные поля скоростей и поле статического давления в щели. Результаты исследований апробированы при изготовлении опытного образца сферической гидростатической опоры.

In the article spherical hydrostatical supports are considered with the stream adjusting of position of sphere. On the basis of method of laminar analogy the parameters of viscous flow of liquid are investigational in the crack of spherical support at the stream adjusting. The vector fields of speeds and field of static pressure are certain in a crack. The results of researches are approved at making of pre-production model of spherical hydrostatical support.

Вступ

Актуальність досліджень

Обладнання на основі просторових механізмів є перспективним напрямком розвитку систем мехатроніки. Найбільш ефективними для застосування в просторових механізмах є гідростатичні сферичні опори із струменевим регулюванням. Дослідження робочих процесів опор із струменевим регулюванням є актуальним.

Постановка проблеми в загальному вигляді

В даний час існує наукова проблема створення високоефективних регульованих сферичних опор високої точності та швидкодії. Вона може бути розв'язана застосуванням струменевого регулювання течії в щілині гідростатичної опори.

Зв'язок проблеми з важливими науковими та практичними завданнями

Розробка прецизійних сферичних опор із струменевим регулюванням дозволяє розв'язати ряд важливих наукових та практичних завдань створення ефективного технологічного обладнання на основі просторових механізмів. Застосування опор рідинного тертя в просторових механізмах дає можливість суттєвим чином підвищити параметри якості їх статичних і динамічних характеристик.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В останніх дослідженнях і публікаціях [1] значну увагу приділено питанням розробки та дослідження гідростатичних опор. Автори досліджують робочі процеси, розробляють теорію конструювання основних елементів опор [2], досліджують їх статичні і динамічні характеристики [3]. Значна кількість робіт присвячена дослідженню гідравлічних характеристик опор [4]. Розглядаються закономірності течії в дроселях, а також процеси вихроутворення в порожнинах гідростатичної опори. Досліджень струменевих течій в щілинах регульованих гідростатичних опор в літературних джерелах не виявлено.

Вирішення невирішених раніше частин загальної проблеми

Розроблена гідростатична сферична опора має регулювання струменевого типу. Регулювання течії рідини здійснюється безпосередньо в щілині. Регулювання в щілині опори значно ефективніше ніж регулювання дроселюванням на вході. Струменеве регулювання є безконтактним і мало інерційним. Дослідження струменевого регулювання положення опори є невирішеною раніше частиною загальної проблеми.

Мета і задачі досліджень

Метою досліджень є детальний аналіз гідродинамічних процесів в щілині гідростатичної сферичної опори із струменевим регулюванням. Для досягнення мети поставлені і вирішені задачі обґрунтування принципів струменевого регулювання, розробки конструктивних схем опори, дослідження струменевих течій і щілині опори та дослідна апробація результатів досліджень шляхом виготовлення дослідного зразка сферичної опори.

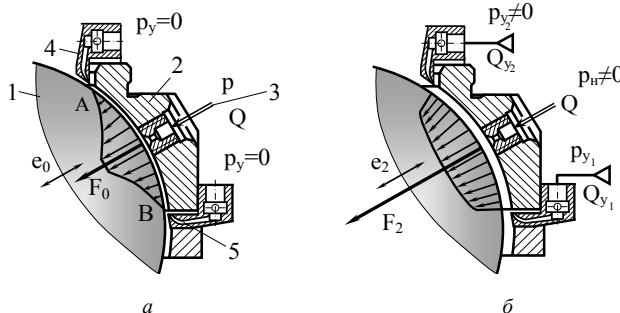


Рис. 1. Схема струменевого регулювання несучої здатності окремого елемента сферичної гідростатичної опори

Виклад основного матеріалу досліджень.**Принцип роботи опори та якісний аналіз гідродинамічних процесів струменевого регулювання тиску в щілині**

Сферична опора із струменевим регулюванням [5, 6] має сферу 1 з якою взаємодіє опорний елемент 2 (рис. 1а)

Опорний елемент має магістраль 3 підводу рідини під тиском p_n з витратою Q . Регулювання опорної реакції здійснюється збільшенням гідродинамічного опору щілини підведеними до її торця струменями робочого середовища. Струмені формуються в соплах 4 і 5 розташованих по периферії щілини опорного елемента. При відсутності струменів (тиск керування $p_y = 0$) елемент має опорну реакцію F_0 при відповідному розподілі тиску в щілині опори між точками A і B .

При наявності тиску керування $p_{y1} \neq 0$,

$p_{y2} \neq 0$ (рис. 1б) в соплах формуються струмені рідини які попадають в області A і B щілини. Тиск в областях A і B щілини збільшується по причині гідродинамічної дії струменів на потік, що витікає із щілини. Збільшення тиску в областях A і B вирівнює епюру тиску на всій площі щілини і відповідно збільшується опорна реакція $F_2 > F_0$.

Регульована сферична опора має два, чотири або більше регульованих гідростатичних опорних елементи. Опора включає сферу 1 з якою взаємодіють опорні елементи 2, 3 (рис. 2).

Кожний опорний елемент має по п'ять отворів, в яких встановлено дроселі 4. Сопла 5 струменевої системи керування розміщені по периферії опорного елемента в колекторах 6. Між сферою і поверхнею опорного елемента наявна щілина розмір якої Δ залежить від навантаження на сферу.

При відсутності тиску керування ($p_y = 0$) опорний елемент працює як гідростатичний підп'ятник, що має п'ять отворів із дроселями. При цьому він сприймає навантаження в будь-якому напрямі.

При наявності тиску регулювання p_{y1} , p_{y2} , в соплах формуються малорозмірні струмені. Формування і розповсюдження струменів має місце на периферії щілини гідростатичної опори, що відповідає області A (рис. 3).

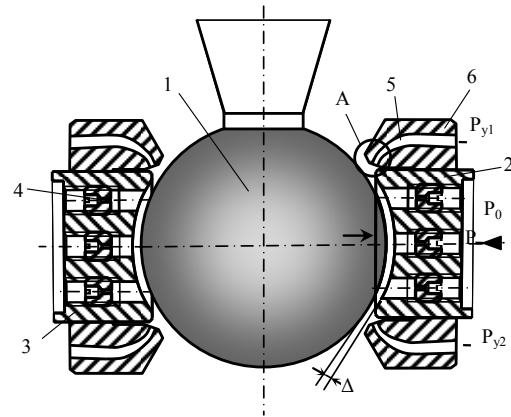


Рис. 2. Конструктивна схема гідростатичної сферичної опори із струменевим регулюванням

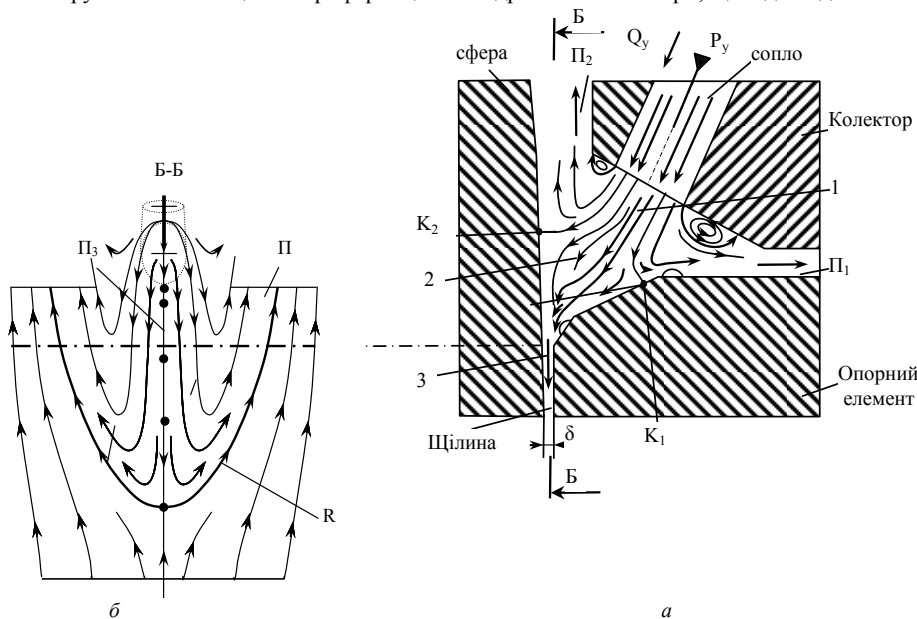


Рис. 3. Картина ліній течії в області A при попаданні керуючого струменя в щілину гідростатичної опори:

а – картина ліній течії в перетині, що відповідає діаметральній площині сопла; б – картина ліній течії в середньому перетині щілини

Предметом досліджень в цій області є визначення гідродинамічних характеристик і параметрів потоку, що витікає із сопла і умов взаємодії струменя із поверхнею отвору. Розглянемо закономірності течії в області A . Струмені 1 попадають на периферійну ділянку щілини опорного елемента, утворюючи складну просторову картину ліній течії (рис. 3а).

Центральна частина струменя між лініями течії з критичними точками K_1 і K_2 формує конфузурну частину потоку 2. На виході потоку 2 за рахунок гідродинамічного тиску формується область підвищеного статичного тиску, яка охоплює вхідну ділянку 3 щілини гідростатичної опори. Під дією гідродинамічного тиску частина рідини із

потіку 2 попадає в щілину 3 і проникає на деяку її глибину. Частина рідини із струменя яка не попала в щілину витікає з області підвищеного тиску двома потоками Π_1 і Π_2 .

В щілині регульованої опори (рис. 3б) формується течія рідини із прямими і зворотніми потоками. Прямий потік Π відповідає витіканню рідини із щілини, а зворотній Π_3 втіканню. Керуючий струмінь формує зворотній потік. Лінія течії R розмежовує прямий і зворотній потоки. Фактично зворотній потік Π_3 зменшує загальну площу вихідного перетину щілини, а відповідно підвищує тиск в щілині.

Експериментальні і теоретичні дослідження струменевих течій в щілині регульованої сферичної опори

При струменевому регулюванні в щілині опори виникає, як показали досліди, ламінарна течія рідини. Дослідження ламінарної течії в щілині проведені на макеті гідростатичної опори виконаному в масштабі 10:1. Запропонована спеціальна методика візуалізації течії [7]. В результаті одержані фото візуалізованої течії в щілині опори (рис. 4а).

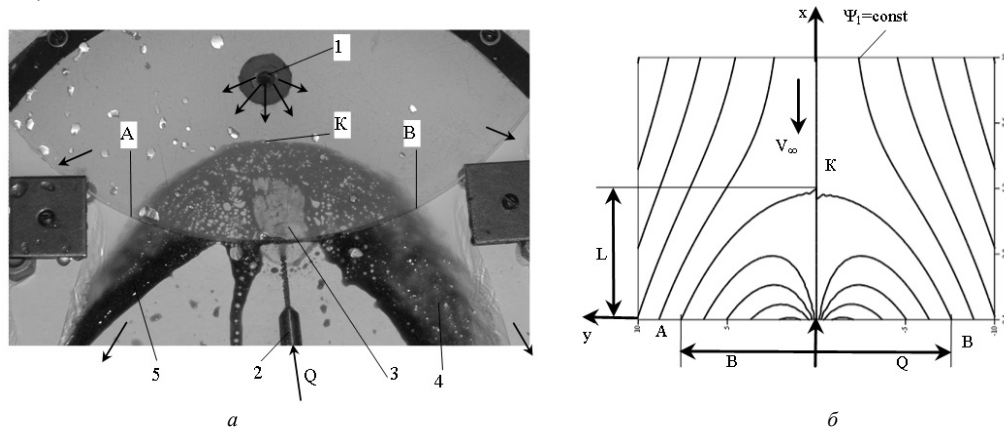


Рис. 4. Фото візуалізованої течії в щілині макета гідростатичної опори при попаданні в неї керуючого струменя (а) та розрахунок траєкторій руху частинок рідини методом ламінарної аналогії (б)

Рідина до щілини опори підводиться через отвір 1 (рис. 4а). Керуючий струмінь формується в соплі 2 і натікає на поверхню опори утворюючи вхідний потік 3. Рідина, що підводиться до сопла підфарбована тому вхідний потік 3 і вихідні потоки 4, 5 мають інший колір ніж прозора рідина, що витікає із отвору 1. Експериментальні дослідження підтвердили відповідність якісної картини течії (див.рис. 3б) експериментальним даним.

Експериментальні дослідження доповнені теоретичним розрахунком траєкторій руху частинок рідини в середньому перетині щілини та розподілу швидкостей в перетинах щілини. Розрахунки виконані на основі методу ламінарної аналогії [8]. Згідно даного методу закономірності розподілу середніх швидкостей при ламінарному русі рідини в щілині опори еквівалентні закономірності розподілу швидкостей при плоскому русі ідеальної рідини.

$$\psi = \sum_{k=0}^n \frac{Q_k}{2\pi} \arctg \left(\frac{y - y_k}{x - x_k} \right), \quad (1)$$

де Q_k – витрата рідини з k-го джерела; x , y - поточні координати визначені в площині щілини; x_k , y_k - координати розташування k-го джерела.

Результати розрахунків траєкторій частинок рідини для втікання одного струменя в щілину (рис. 4б) відповідають експериментальними даним (див. рис. 4а). Експериментально визначена форма області яку займає керуючий струмінь (лінія АКВ) в щілині опори відповідає розрахунковим значенням. Це підтверджує достовірність розрахунків параметрів течії методом ламінарної аналогії.

Для опори в якій наявні п'ять отворів розроблена методика розрахунку траєкторій руху частинок рідини в щілині опори. Траєкторія частинок рідини при взаємодії струменів має такий вигляд (рис. 5).

При відсутності керуючих струменів розрахунок течії в щілині здійснюється за формулою (1) шляхом суперпозиції $n = 5$ джерел ($k=0, 1, \dots, 4$) (рис. 5а).

Траєкторії руху частинок рідини в середньому перетині щілини мають характерний вигляд. Наявні чотири критичні точки T_1 в околиці яких швидкість частинок рідини близька до нуля. Течія в щілині симетрична, коли зазор між сферичними поверхнями (розмір щілини) є однаковим. В щілині мають місце області течії S_1 , S_2 які відповідають витіканню рідини із центрального ($k=0$) та периферійного ($k=1,2,3$) отворів.

При наявності керуючих струменів розрахунок течії здійснено шляхом суперпозиції 13 джерел (рис. 5б). В щілині опори виникають області течії S_3 , S_4 , де має місце проникнення керуючих струменів в щілину. Область S_3 є більш протяжною по причині низької інтенсивності течії в області S_1 . Область S_4 є меншою ніж область S_3 тому, що вона знаходиться в області інтенсивної течії S_2 .

Виконано розрахунки плоского руху ідеальної рідини, а результати перенесені на розрахунок в'язкої рідини в щілині. Функція течії плоского руху ідеальної рідини одержана у вигляді суперпозиції функцій течії n джерел (витоків) рідини [9]:

Розраховані значення функції течії використано для знаходження максимальних швидкостей в перетинах щілин. Швидкості знайдені шляхом символічного диференціювання залежності (1) відповідно формул

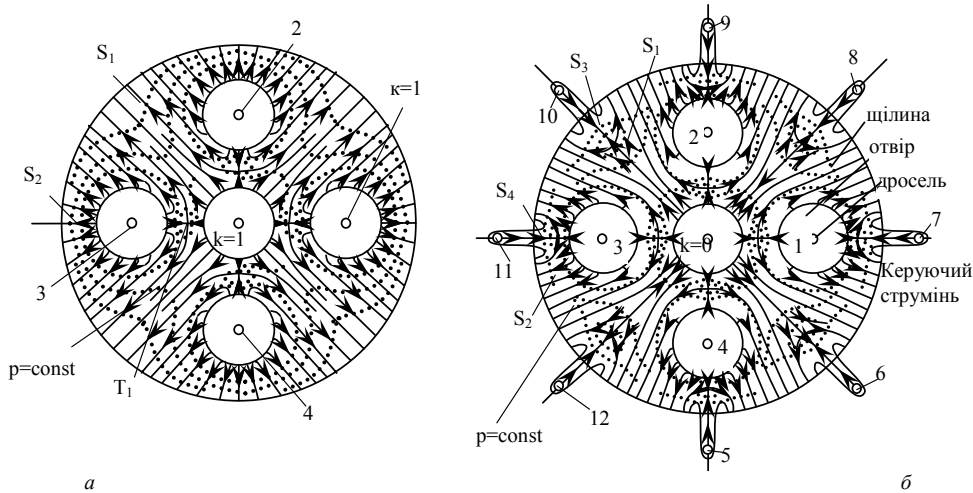


Рис. 5. Траєкторії руху частинок рідини в середньому перетині щілині гідростатичної опори: а – при відсутності керуючих струменів; б – при наявності 8-ми керуючих струменів

$$V_{xm} = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad V_{ym} = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$$

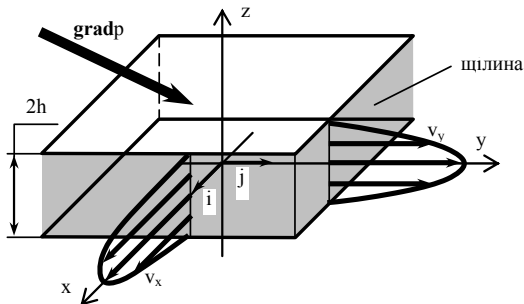


Рис. 6. Профілі проєкцій швидкостей ламінарного руху рідини в перетинах щілини опори

В результаті диференціювання формули (1) знайдено проєкції максимальних швидкостей в перетині щілини з координатами x і y

$$V_{mx} = \sum_{k=0}^n \frac{Q_k}{2\pi} \cdot \frac{(x - x_k)}{[(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2]},$$

$$V_{my} = \sum_{k=0}^n \frac{Q_k}{2\pi} \cdot \frac{(y - y_k)}{[(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2]} \quad (2)$$

В кожному перетині щілини шириною $\Delta = 2h$ має місце параболічний розподіл проєкцій швидкостей (рис.6).

Проєкції швидкостей в перетинах

описуються параболічними залежностями

$$v_x = V_{mx} \left[1 - \left(\frac{z}{h} \right)^2 \right], \quad v_y = V_{my} \left[1 - \left(\frac{z}{h} \right)^2 \right]$$

де $h = \frac{\Delta}{2}$ - півширина щілини.

Залежності (2) є основою обчислення поля максимальних швидкостей по всій площі щілини опори. Векторне поле максимальних швидкостей в щілині знаходиться у вигляді

$$\vec{V}_m = \vec{i} V_{mx} + \vec{j} V_{my},$$

де \vec{i} і \vec{j} - орти декартової системи координат x , y .

Векторне поле максимальних швидкостей пов'язане із полем градієнта статичного тиску по площі щілини

$$\vec{\text{grad}} p = -\frac{2\mu}{h^2} \vec{V}_m,$$

де μ - динамічна в'язкість рідини.

Відповідно проєкції градієнта тиску

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{2\mu}{h^2} V_{mx}, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = -\frac{2\mu}{h^2} V_{my}$$

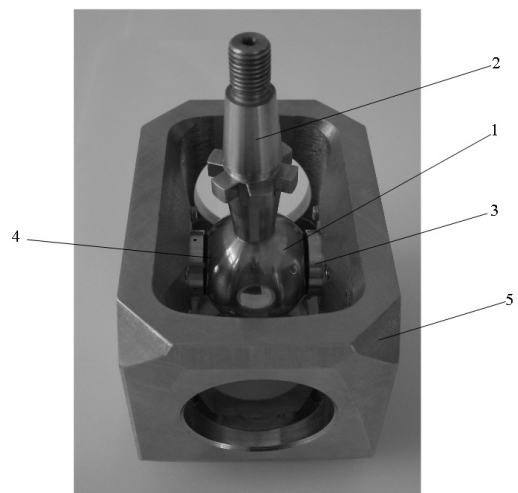


Рис. 7. Дослідний зразок сферичної гідростатичної опори

Інтегрування даних залежностей визначає скалярне поле статичного тиску в перетині щілини обчисленням інтеграла по деякій лінії L .

$$p = \int_L \frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy$$

Відповідним вибором набору ліній L_1, L_2, \dots охоплено характерні області щілини і визначено поле статичного тиску в щілині. Ізобари течії показані пунктирними лініями на рис. 5. В області критичних точок течії має місце підвищення статичного тиску.

Прикладні аспекти реалізації сферичної гідростатичної опори.

На основі приведених досліджень струменевих течій в щілинах регульованих сферичних гідростатичних опор розроблено і виготовлено дослідний зразок гідростатичної опори (рис. 7).

Опора має сферу 1 виготовлену заодно із хвостовиком 2. Із сферою взаємодіють вставки 3, 4 які встановлені в корпусі 5. У вставках виконані комунікації системи живлення гідростатичних опорних елементів.

Виготовлення деталей опори потребує вирішення ряду технологічних проблем. В основному вони полягають в забезпеченні необхідної точності сфери і сферичних поверхонь вставок (рис. 8).

Сфера 1 має діаметр $34,995 \pm 0,002$ мм. Середньоарифметичне відхилення мікропрофіля сфери складає $R_a = 0,08 - 0,1$ мкм. Вставка 2 має точну сферичну поверхню 3 з отворами, в яких встановлені дроселі 4.

Висновки

1. На основі проведених досліджень встановлено характерні особливості гідродинамічних процесів, що протікають в щілині регульованої сферичної гідростатичної опори. Особливістю процесів є локальне проникнення керуючих струменів в щілину опори із утворенням критичних областей підвищеного тиску, де швидкість частинок рідини близька до нуля. Траєкторії частинок рідини відповідають експериментальним даним одержаним на макеті гідростатичної опори з візуалізацією течії введенням барвників у рідину керуючих струменів.

2. Здійснено розрахунки гідродинамічних параметрів течії в щілині. Зокрема, визначено векторне поле максимальних швидкостей в перетинах щілини, параболічні закони зміни проєкцій швидкості між стінками щілини та розподіл тиску по площі щілини.

3. Результати досліджень підтвержені апробацією основних наукових положень при розробці і виготовленні дослідного зразка сферичної гідростатичної опори.

4. Як напрямок подальших досліджень рекомендується розробка рекомендацій по проектуванню регульованих гідростатичних опор, та необхідне технологічне забезпечення конструкції регульованої сферичної опори з використанням новітніх технологій машинобудування.

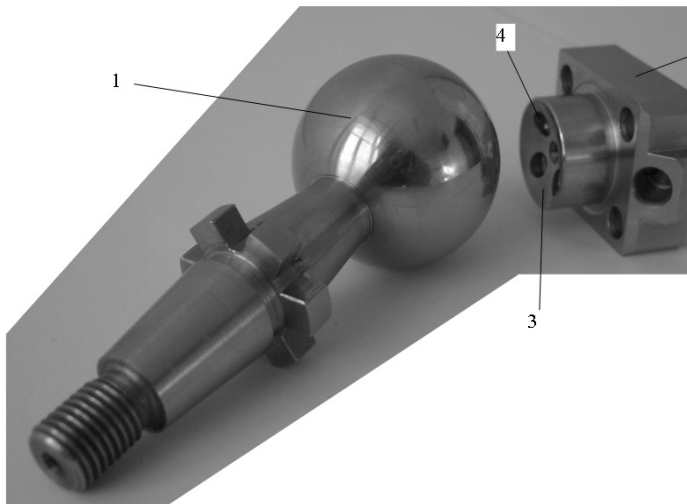


Рис. 8. Основні деталі виготовленої сферичної опори

Список літератури

1. Воскресенский В.А., Дьяков В.И., Зиле А.З. Расчет и проектирование опор жидкостного трения. – М.: Машиностроение, 1983. – 232с.
2. Шиманович М.А. Безконтактные опоры с внешним источником давления смазочной среды. – Станки и инструменты № 6, 1987, с. 16 – 18.
3. Strutinsky S. Development of the Managed Spherical Aerostatics Hinges for the Exact Spatial Mechanisms of Gexapod / S. Strutinsky, O. Jachno // 10 Anniversary international scientific conference Unitech'10. Proceedings / 19-20 November 2010, Gabrovo, Bulgaria. P. II-385 – II-390.
4. Strutinsky S. Technological provision of controlling the spherical aerostatic supporting knots of spatial mechanism in the quality mechatronic systems / S. Strutinsky, O. Jachno // Stowarzyszenia Inzynierow i Technikow Mechanikow Polskich, Wroclaw / Hydraulika i Pneumatyka. – № 6/2009, p.p. 19 – 23
5. Струтинський С.В. Реалізація струйних технологій в системі регулювання положення гідростатичної сферичної опори / С.В. Струтинський, О.М. Яхно // Сборник докладов межд.научн.-техн. конф. «Гидропневмосистемы мобильных и технологических машин» / 17-19 ноября 2010 г., БНТУ, Минск, Республика Беларусь. С.262-270.
6. Патент України на корисну модель №31194. МПК (2006) F16C32 / Гідростатично-аеростатичний опорний вузол / Яхно О.М., Струтинський С.В. (UA). – №U200714415; заявл.20.12.2007; опубл. 25.03.2008, Бюл. №6. – 3с.
7. Струтинський С.В. Теоретичні дослідження гідродинамічних процесів регульованої гідростатичної опори на основі методу ламінарної аналогії / С.В. Струтинський // Промислова гідравліка і пневматика. – 2008. – №4 (22). – С.61-66.
8. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. 2е изд.-Л.: Машиностроение, 1976.-504с.
9. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 847с.