

Т.В. Тарасенко, канд. техн. наук,
М.М. Глазков, канд. техн. наук,
В.Г. Ланецький, канд. техн. наук
Національний авіаційний університет, м. Київ

РОЗРАХУНОК КРИТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КАВІТАЦІЙНОГО ВИТІКАННЯ ЧЕРЕЗ ДРОСЕЛЬНІ ПРИСТРОЇ

Рассмотрены особенности расходных кавитационных характеристик типовых дросельных устройств гидротривода и расчетные зависимости для определения критических параметров истечения. Обоснован кавитационный способ определения гидродинамических коэффициентов дросельных устройств, определение которых традиционным способом представляет значительные трудности вследствие особенностей высоконапорного дроселирования малоразмерных струй.

The features of expense cavitation descriptions of model choke devices of hydraulic drive and calculation dependences are considered for determination of critical parameters of expiration. The cavitation method of determination of hydrodynamic coefficients of choke devices determination of which by a traditional method presents considerable difficulties because of features of high-pressure baffing of littersize streams is grounded.

Вступ

При перебігу рідини в гідравлічних системах, якщо потік дроселюється зі значним перепадом тиску, виникає кавітація. У гідроприводах кавітація явище небажане. Але можна вказати і на приклади його використання для реалізації функцій керування витратою рідини, генерування коливань тиску, для очищення, емульгування рідин, інтенсифікації хімічних реакцій.

Результати досліджень

Існує можливість узагальнити методи інженерного розрахунку критичних параметрів перебігу рідини через типові дросельні пристрої гідропривода. Характерна особливість кавітаційного перебігу рідини полягає в тому, що витрата рідини через дросельний пристрій стабілізується з моменту досягання критичного перепаду тиску. На рисунку 1 показано витратні характеристики типових дросельних пристроїв: із конфузorno-дифузornoним каналом (крива 5), конфузorno-дифузornoним каналом укороченим (крива 4), насадок Борда (крива 3), циліндричний насадок (крива 2), діафрагма (крива 1). Вимірювання виконано при постійному входньому і змінному вихідньому тисках. Безрозмірна форма витратної характеристики $(\bar{Q})^2 = f(\Delta\bar{p})$ дозволяє порівнювати експерименти для довільних значень тиску на вході у насадок для певної геометрії дросельного каналу.

Розрахунки кавітаційних характеристик гідродинамічних генераторів коливань тиску, регуляторів витрати потребують кількісної оцінки ступеню розвитку кавітації. За критерієм кавітації для геометричних і динамічних подібних умов можна оцінити ступінь розвитку кавітаційного процесу незалежно від інших факторів. В дійсності характер та інтенсивність процесу кавітації залежить від великого числа факторів, вплив яких є складним і його до кінця не вивчено.

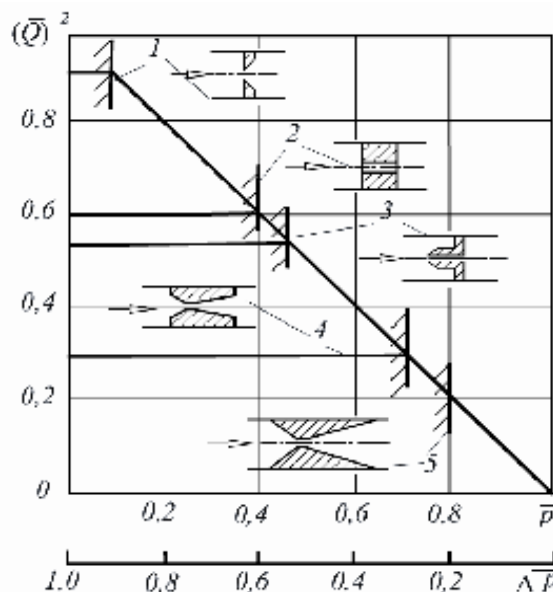


Рисунок 1 — Типи дросельних пристроїв та їх кавітаційні характеристики; 1 — діафрагма; 2 — циліндричний насадок Вентурі; 3 — насадок Борда; 4 — конфузorno-дифузornoний насадок скорочений; 5 — труба Вентурі.

Критерій кавітації є складною функцією багатьох змінних. Існуючі критерії не мають універсального характеру, але дозволяють у першому наближенні оцінити ступінь розвитку і динаміку процесу. Їх застосування з урахуванням відомих обмежень не викликає ускладнень в інженерній практиці [1].

Критерій кавітації — число кавітації k — прийнято розраховувати як

$$k = \frac{2(p_{\text{вих}} - p_{\text{н.п}})}{\rho V_{\text{ст}}^2}, \quad (1)$$

де $p_{\text{вих}}$ — статичний тиск на виході дросельного каналу; $p_{\text{н.п}}$ — тиск насичених парів рідини; ρ — густина рідини; $V_{\text{ст}}$ — швидкість руху рідини в стисненому перерізі потоку.

Припускаючи, що

$$\frac{p_{\text{кав}}}{p_{\text{вх}}} \approx 0, \text{ маємо}$$

$$k = \frac{p_{\text{вих}}}{p_{\text{вх}}} = \bar{p}. \quad (2)$$

Таким чином, в якості критерія кавітації для випадку високонапірного перебігу рідини може бути використане значення (2) безрозмірного протитиску за дросельним пристроєм \bar{p} . Це зручніше, ніж використання універсального критерію k , оскільки протитиск у долях тиску входу розраховується простіше, ніж динамічний тиск.

Тиск входу можна записати у вигляді

$$p_{\text{вх}} = \Delta p + p_{\text{вих}}, \quad (3)$$

де Δp — перепад тиску в дросельному каналі.

Після ділення рівняння (2.3) на $p_{\text{вх}}$, отримуємо

$$\frac{\Delta p}{p_{\text{вх}}} + \frac{p_{\text{вих}}}{p_{\text{вх}}} = \overline{\Delta p} + \bar{p} = 1, \quad (4)$$

де $\overline{\Delta p}$ — безрозмірний перепад тиску в дросельному каналі.

Таким чином, безрозмірний протитиск \bar{p} і безрозмірний перепад тиску $\overline{\Delta p}$ в сумі дорівнюють безрозмірному тиску входу в дросельний канал.

Для умов перебігу рідини в момент зародження кавітації ці параметри приймають критичне значення:

$$\bar{p}_{\text{кр}} = 1 - \overline{\Delta p}_{\text{кр}}.$$

При дослідженні течії рідини у дросельному пристрої неврахування подібності за числом кавітації призводить до „розшарування” значень безрозмірних гідравлічних коефіцієнтів витрати μ при рівних числах Рейнольдса Re . Так, в [1] відзначається той факт, що одному і тому ж числу Re для геометрично подібних каналів можуть відповідати декілька значень коефіцієнтів витрати μ або опору ξ . Фіксованому значенню Re відповідає одне значення коефіцієнту витрати рідини без кавітації μ_I і множина значень коефіцієнта витрати при виникненні кавітації. Це явище пояснюється впливом протитиску. Поправка на вплив протитиску може бути врахована двома способами — або корегуванням значень коефіцієнтів витрати без кавітації μ_I та з кавітацією μ_{II} , величина яких автономна відносно критерію кавітації k . Коефіцієнт витрати μ_I не залежить від числа кавітації, оскільки він відповідає безкавітаційній течії. Коефіцієнт витрати μ_{II} зберігає постійну величину для всіх ступенів розвитку кавітації. Таким чином, при течії рідини у дросельному каналі з кавітацією слід використовувати значення коефіцієнтів витрати μ_{II} , а при її відсутності — значення μ_I . Для відмежування кавітаційних режимів течії від режимів течії без кавітації рекомендовано використовувати критерій $P_{\text{кр}}$ або $\overline{\Delta p}_{\text{кр}}$. При розрахунку втрат енергії слід установити залежність безрозмірних коефіцієнтів від ступеня розвитку

кавітації. Встановлено залежність коефіцієнту опору ξ_{II} від ступеня розвитку кавітації

$$\xi_{II} = \xi_I \frac{1 - \bar{p}}{1 - \bar{p}_{\text{кр}}} = \xi_I \frac{\overline{\Delta p}}{\overline{\Delta p}_{\text{кр}}}. \quad (5)$$

Таким чином, користуючись залежністю (5), можна знайти гідравлічний опір насадка ξ_{II} для певного ступеня розвитку кавітації за відомим значенням коефіцієнта гідравлічного опору в момент виникнення кавітації ξ_I .

Аналогічно можна скорегувати значення коефіцієнтів витрати μ_{II} у залежності від ступеня розвитку кавітації.

Перепад тиску на дроселі при перебігу рідини з кавітацією можна записати у вигляді

$$\Delta p_{II} = \xi_I \frac{1 - \bar{p}}{1 - \bar{p}_{\text{кр}}} \rho \frac{V_{\text{ст}}^2}{2}. \quad (6)$$

Витрата рідини через дросель для цього режиму буде стабільною і визначиться як

$$Q_{\text{стаб}} = \varepsilon \omega V_{\text{ст}} = \frac{\varepsilon \omega}{\sqrt{\xi_I}} \sqrt{\frac{1 - \bar{p}_{\text{кр}}}{1 - \bar{p}}} \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p_{II}}, \quad (7)$$

де ε — коефіцієнт стиснення струменя рідини; ω — площа перетину дросельного отвору; $V_{\text{ст}}$ — швидкість руху рідини в стисненому перерізі потоку; ξ_I — коефіцієнт гідравлічного опору в момент виникнення кавітації; Δp_{II} — перепад тиску в дросельному каналі для даного режиму кавітаційної течії рідини через дросель.

Формулу (7) для $Q_{\text{стаб}}$ можна переписати у вигляді

$$Q_{\text{стаб}} = \mu_I \omega \sqrt{\frac{1 - \bar{p}_{\text{кр}}}{1 - \bar{p}}} \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p_{II}}. \quad (8)$$

З формули (2.8) випливає, що

$$\mu_{II} = \mu_I \sqrt{\frac{1 - \bar{p}_{\text{кр}}}{1 - \bar{p}}}. \quad (9)$$

При цьому слід зазначити, що застосуємо для розрахунку проміжних значень коефіцієнтів опору ξ_{II} . При визначенні витрат для довільного ступеня розвитку кавітації достатньо знати коефіцієнти витрати μ_I і μ_{II} . Оскільки протитиск \bar{p} однозначно пов'язаний з числом кавітації k

Для випадку, коли $p_{\text{кав}}$ приймає значення одного порядку, як і тиск на вході у дросель, залежність для розрахунку критичного протитиску приймає вигляд

$$\bar{p}_{\text{кр}} = 1 - \left(1 - \frac{p_{\text{кав}}}{p_{\text{вх}}} \right) \left(\frac{\mu_{II}}{\mu_I} \right)^2. \quad (10)$$

Оскільки $p_{\text{вх}} = \Delta p_{\text{кр}} + p_{\text{вих.кр}}$, то, розділивши обидві частини виразу на $p_{\text{вх}}$, будемо мати:

$$1 = \overline{\Delta p}_{\text{кр}} + \bar{p}_{\text{кр}}.$$

Замінивши у рівнянні (10) протитиск $\bar{p}_{\text{кр}}$ через перепад $\overline{\Delta p}_{\text{кр}}$, отримаємо:

$$\overline{\Delta p}_{кр} = \left(1 - \frac{p_{кав}}{p_{вх}}\right) \left(\frac{\mu_{II}}{\mu_I}\right)^2 \quad (11)$$

Наявність газових компонент у рідині прискорює процес виникнення кавітації і підвищує статичний тиск у зоні кавітації в порівнянні з тиском насичених парів, оскільки кавітаційні каверни заповнені не тільки парами рідини, але і газом. Дроселювання потоку рідини, крім того, супроводжується додатковим виділенням газів, які розчинені в рідині. Виділення газів спостерігається у довільній точці потоку, де тиск стає нижчим тиску насичення рідини газом. Якщо кавітаційні бульбашки при проходженні зони розрідження змінюють в основному свої розміри внаслідок дифузії газу із оточуючої рідини, то таку кавітацію називають „газовою” кавітацією. Дійсна або „парова” кавітація виявляється при заповненні каверн тільки парами рідини.

Явище виділення газу із рідини при дроселюванні потоку ретельно вивчено у багатьох роботах. Установлено, що виділення повітря розпочинається за тиском у потоці, що складає приблизно 50% від тиску насичення рідини повітрям у баці. Критерієм виникнення „газової” кавітації в даній роботі було візуальне спостереження виділення перших бульбашок повітря. Експерименти було проведено переважно для всмоктувальних магістралей гідросистем значної довжини при відносно низьких тисках насичення повітрям (від 0,1 до 0,2 МПа).

Для напірних ділянок гідравлічних систем величиною $\frac{p_{кав}}{p_{вх}}$ можна знехтувати. Тоді рівняння (10) і (11) набудуть вигляду:

$$\overline{p}_{кр} = 1 - \left(\frac{\mu_{II}}{\mu_I}\right)^2 \quad (12)$$

$$\overline{\Delta p}_{кр} = \left(\frac{\mu_{II}}{\mu_I}\right)^2 \quad (13)$$

У подальшому $\overline{\Delta p}_{кр}$ будемо називати відносним (безрозмірним) критичним перепадом тиску, а $\overline{p}_{кр}$ — відносним (безрозмірним) критичним протитиском.

Відносний критичний перепад тиску $\overline{\Delta p}_{кр}$, як випливає з аналізу формули (11), визначається двома факторами:

- гідродинамічними характеристиками дроселя (коефіцієнтами витрати μ_{II} та μ_I);
- кавітаційними властивостями рідини.

Отже, величина мінімального тиску $p_{кав}$, при якому в потоці рідини виникають розриви суцільності (кавітаційні каверни), характеризує кавітаційні властивості рідин.

Критичні параметри течії можна визначити також через значення гідродинамічних коефіцієнтів ξ і ε [2]. Наприклад, для конфузорно-дифузорного насадк

$$\Delta \overline{p}_{кр} = \frac{\xi_{кон} + \xi_{диф}}{1 + \xi_{кон}}, \quad (14)$$

де $\xi_{диф}$ — коефіцієнт місцевого опору дифузору;

$\xi_{кон}$ — коефіцієнт опору конфузору;

Для циліндричного насадк:

$$\Delta \overline{p}_{кр} = \frac{\varepsilon^2 (1 + \xi_{нас})}{1 + \xi_{ст}}, \quad (15)$$

де ε — коефіцієнт стиснення струменю; $\xi_{ст}$ — коефіцієнт опору стиснутого перерізу; $\xi_{нас}$ — коефіцієнт опору насадк. У зв'язку з цим доцільно розглянути метод визначення коефіцієнтів Φ і ε . Якщо критичне значення протитиску \overline{p} велике, то кавітація малоймовірна. При зменшенні протитиску до нуля можливість кавітації збільшується. Конкретні значення критичних параметрів залежать від геометрії дросельного каналу, властивостей рідини, числа Рейнольда і умов дроселювання. Значення \overline{p} слід назначати з запасом, враховуючи нештатні режими функціонування системи.

Повний комплекс безрозмірних гідродинамічних коефіцієнтів витікання складається з наступних величин: μ_I ,

μ_{II} , Φ , ε , $\xi_{кон}$, $\xi_{диф}$, $\xi_{ст}$.

Відомі різні способи визначення гідродинамічних коефіцієнтів стискання і швидкості струменя, а саме:

- вимірювання геометричних розмірів живого перерізу струменя у місці найбільшого стиснення;
- вимірювання швидкості струменя при перебігу рідини;
- вимірювання реактивної сили струменя.

Всі зазначені способи апаратурно складні і трудомісткі. Струмінь може мати досить складну форму в разі перебігу рідини через щілини клапанів, золотникових розподільників тощо. Наприклад, для визначення коефіцієнта стиснення струменя Базен використовував шайбу з 24 мікрметричними гвинтами [4]. Визначення швидкості струменя за траєкторією його падіння має відносну точність. Процедура визначення коефіцієнтів перебігу рідини крізь дросельний пристрій може бути спрощена за рахунок вимірювання виключно витратних характеристик потоку, які однозначно визначаються коефіцієнтами витрати у режимах течії без кавітації μ_I і з кавітацією μ_{II} [1].

При цьому виключається необхідність складних вимірювань площі струменя, або швидкості струменя по його траєкторії, або ж реактивної сили, що притаманно традиційним способам вимірювання коефіцієнтів ε і Φ . Запропоновано спосіб кавітаційного визначення гідродинамічних коефіцієнтів течії, який підвищує точність вимірювання коефіцієнтів витікання.

Суть запропонованого способу пояснюється на рисунку 2, на якому показано графіки експериментального визначення коефіцієнтів витрат μ_I (течія без кавітації) і μ_{II} (течія з кавітацією) у залежності від числа Рейнольда.

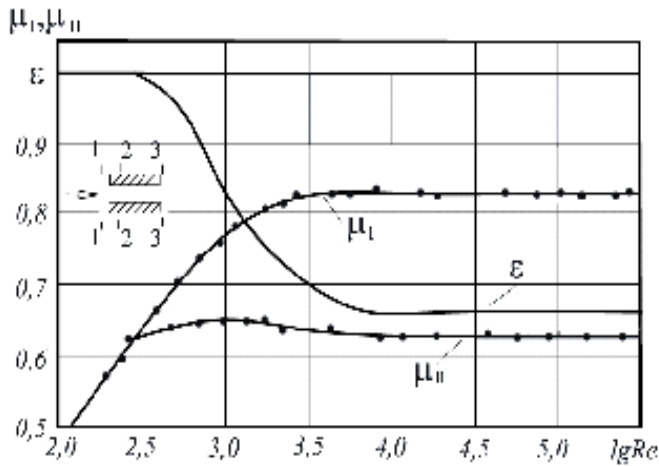


Рисунок 2 — Графік залежностей коефіцієнтів витрати і стиснення струменя від числа Рейнольдса для циліндричного насадку.

Можливість раціоналізації за даним способом визначення коефіцієнтів ε і Φ проілюструємо на прикладі течії через циліндричний насадок Вентурі, характеристики якого добре вивчено. Відомо, що для цього насадку значення коефіцієнтів течії відомі і для зони квадратичного режиму: $\mu_I = 0,82$; $\mu_{II} = 0,62$; $\varepsilon = 0,64$; $\Phi = 0,97$. При достатньо великих числах $Re \geq 10^4$ втрати напору пропорційні квадрату швидкості. Наведені значення ε знайдено традиційним шляхом — прямим вимірюванням перерізу струменю або траєкторії струменю, а Φ реалізується через значення μ_{II} і ε :

$$\Phi = \frac{\mu_{II}}{\varepsilon} = \frac{0,62}{0,64} = 0,97.$$

Розрахунок ε за цим способом дає результат [3]:

$$\varepsilon = \frac{2}{2 + \left(\frac{1}{\mu_{II}}\right)^2 - \left(\frac{1}{\mu_I}\right)^2} = \frac{2}{2 + \left(\frac{1}{0,62}\right)^2 - \left(\frac{1}{0,82}\right)^2} = 0,64. \quad (16)$$

Розрахункова залежність отримана у результаті сумісного розв'язку рівнянь Бернуллі, записаних для перерізів потоку на вході і виході з насадку, а також на вході і у стиснутому перерізі потоку:

$$\frac{p_{вх} - p_{кр}}{\rho g} = (1 + \xi_{ст} - n^2 \varepsilon^2) \frac{v_{ст}^2}{2g},$$

$$\frac{p_{вх} - p_{кр}}{\rho g} = \left[\xi_{ст} + (1 - \varepsilon) + \varepsilon^2 (1 - m)^2 + \right] \frac{v_{ст}^2}{2g},$$

де $v_{ст}$ — швидкість у стисненому перерізі; $\xi_{ст}$ — коефіцієнт опору стиснутого перерізу; $p_{вх}$ — тиск на вході в насадку; $p_{вих}$ — тиск на виході з насадку; ε — коефіцієнт стиснення струменя; n — коефіцієнт розширення струменя; m — коефіцієнт звуження струменя.

Залежність гідродинамічних коефіцієнтів від числа

Рейнольдса при витіканні рідини через конфузорно-дифузорний насадок наведено на рисунку 3.

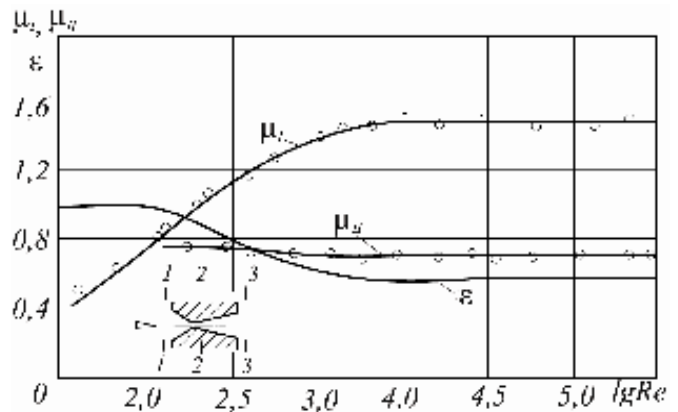


Рисунок 3 — Графік залежностей коефіцієнтів витрати і стиснення струменя від числа Рейнольдса для конфузорно-дифузорного насадку.

Таким чином, запропонований спосіб визначення коефіцієнтів витікання спрощує процедуру експеримента, лише необхідно визначити значення коефіцієнтів течії μ_I і μ_{II} .

Висновки

1. Проведено дослідження кавітаційних характеристик дросельних пристроїв показали, що для визначення гідродинамічних коефіцієнтів течії зручно використовувати кавітаційний спосіб, який менш трудомісткий і його можна застосувати для будь-якого дросельного пристрою.
2. Запропоновано розрахункові залежності для визначення критичного перепаду тиску на дросельному пристрої.
3. Запропоновано розрахункові залежності для визначення коефіцієнта стиснення і гідралічного опору дроселя для певного ступеня розвитку кавітації.

Література

1. Глазков, М.М. Кавитация в жидкостных системах воздушных судов / М.М. Глазков, В.Г. Ланецкий, Н.Г. Макаренко, И.П. Челюканов. — К.: КИИГА, 1987. — 62 с.
2. Арзуманов Э.С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях / Э.С. Арзуманов. — М.: Энергия, 1978. — 303 с.
3. Пат. 43544 Україна, МПК В01F 5/00. Кавітаційний спосіб визначення коефіцієнтів стиснення і швидкості струменя рідини при витіканні крізь отвори і насадки / Глазков М.М., Ланецкий В.Г.; заявник і патентотримач Глазков М.М., Ланецкий В.Г. — № u2009 01683; заявл. 26.02.09; опубл. 25.08.09, Бюл. № 16.
4. Френкель, И.З. Гидравлика / И.З. Френкель. — М.: Государственное энергетическое издательство, 1947. — 459 с.

Надійшла 20.12.2911 р.