

Т.В. Тарасенко, канд. техн. наук

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ КАВІТАЦІЙНИХ ЯВИЩ У ДРОСЕЛЬНИХ ПРИСТРОЯХ

Рассмотрен механизм генерирования кавитационных колебаний давления при истечении жидкости через дроссельные устройства. Исследования проводились для конфузорно-диффузорного насадка и насадка Вентури. Определены основные параметры кавитационного истечения жидкости через дроссельные насадки.

In this article the mechanism of generating of pressure cavitation oscillation at liquid expiration through the throttle devices are investigated. The researches were made out for confuser-diffuser mouthpiece and Venturi's mouthpiece. The basic parameters of cavitation expiration of liquid through throttle mouthpieces were defined.

Вступ

Протягом перебігу рідини у гідралічних системах, якщо потік дроселюється зі значним перепадом тиску, виникає кавітація. У гідроприводах кавітація, як правило, є явищем небажаним. Але можна вказати і на прикладі використання кавітації для реалізації функцій керування витратою рідини, генерування коливань тиску, для очищення, смульгування рідин, інтенсифікації хімічних реакцій. Важливо зауважити, що корисна функція реалізується у кавітаційному пристрої паявши чилом без застосування допоміжних елементів (кранів, золотників, клапанів та ін.). Для ефективного використання кавітаційних явищ у технологічних процесах необхідно дослідити механізм виникнення кавітаційних пульсацій тиску.

Аналіз досліджень

Особливості високочастотних кавітаційних коливань тиску полягають в перетворенні стаціонарного потоку в пульсуючий.

У роботі [1] запропоновано механізм самозбудження автоколивань, пов'язаних з пульсацією розмірів осі-лої кавітаційної каверні в трубці Вентури. У розглянутому механізмі підвід енергії до коливальної системи обумовлено зміною втрат тиску на раптове розширення потоку за кавітаційною каверною в залежності від її розмірів і швидкості рідини в перерізах, де замикається каверна. Частота кавітаційних коливань тиску визначається інерційним опором трубопроводу за трубою Вентури і податливістю кавітаційної зони в трубці.

У роботі [2] описано механізм коливань тиску, що генерується періодично відривною кавітацією в пропотій частині трубки Вентури. Запропоновано модель генерування кавітаційних коливань тиску, яка заснована на моделі дискретного струменя. Модель враховує вплив на коливання тиску повітря, що виділюється у зоні кавітації, а також додатковий розгін струменя рідини через виникнення в ній розривів.

Мета досліджень

Обґрунтувати механізм генерування кавітаційних коливань тиску для розрахунку основних параметрів кавітаційної течії з метою застосування кавітаційних техно-

логій для очищення елементів гідралічної апаратури від забруднень.

Основні результати досліджень

Про структуру кавітаційних струменів у дросельних пристроях можна тлумачити на основі аналізу кінограм, які виконані із частотою зйомки порядку 10^{-5} с. Схематично зародження кавітаційної зони може бути представлено паступово спрощеною схемою (рисунок 1).

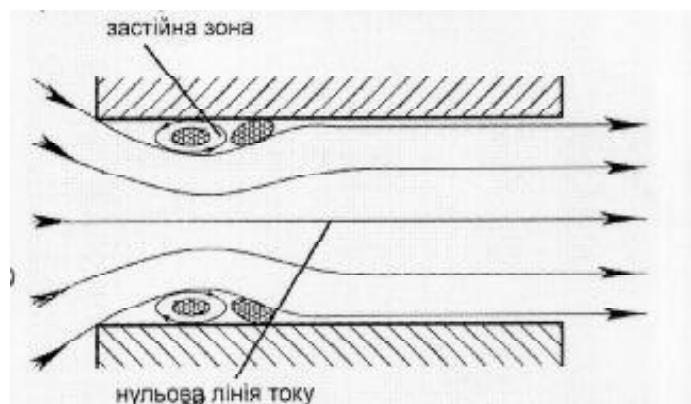


Рисунок 1— Схема утворення початкової стадії кавітаційної зони у насадку Вентури

Каверни виникають у потоці рідини, що витікає через насадок Вентури у момент зменшення тиску у стисненому перерізі. У цьому перерізі тиск падає до тиску „порогу” кавітації. Тиск „порогу” кавітації дещо перевищує тиск насичених парів рідини „ядрами” кавітації у вигляді мікрокопотічних бульбашок вільного повітря (розміри порядку 10 мкм). Каверни локалізуються у центрі вихорів, що генеруються у застійній області, і зносяться донизу по потоку. Із збільшенням швидкості течії рідини через насадок збільшуються вихорі в застійній зоні і збільшується кількість каверн, що мігрує донизу по потоку. Об'єм газової фази постійно збільшується внаслідок сепарації газових бульбашок і дегазації рідини. Так утворюються газові пробки, які переходят у транзитний струмінь і ділять його на частини. Струмінь набуває „дирчату” структуру (рисунок 2).

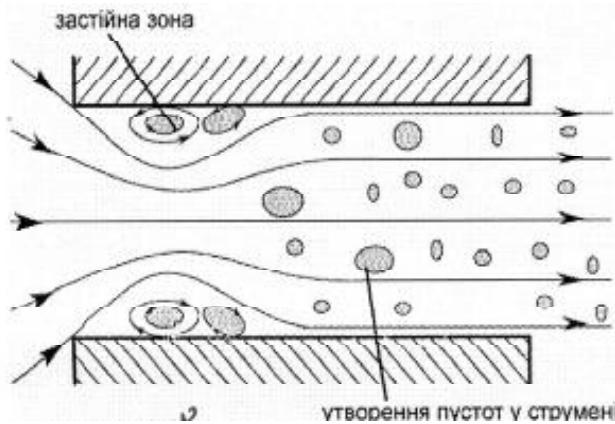


Рисунок 2 — Утворення повітряних каверн у потоці робочої рідини

Розриви суцільності або стискають переріз струменя, або переривають його повністю (рисунок 3). Швидкість струменя при стабільному значенні витрати зростає до значення, яке відповідає перепаду $\Delta p_{kp} = p_{ax}^{abc} - p_{kav}$. На границі кавітації швидкість передбігу відповідатиме перепаду тиску $\Delta p = p_{ax} - p_{max}$.

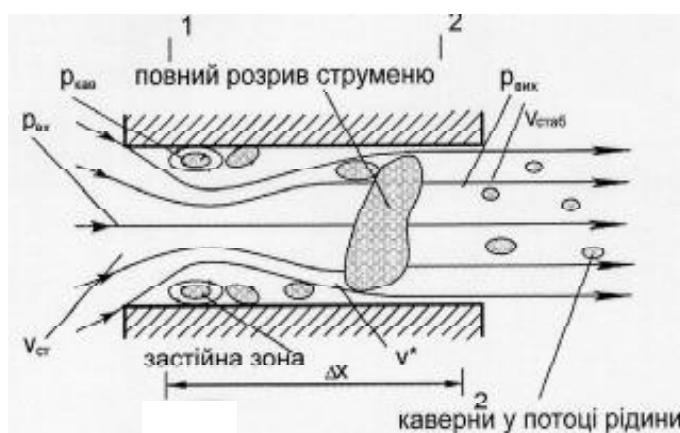


Рисунок 3 — Схема повного розриву струменя у циліндричному насадку

У перерізах потоку, де суцільність течії відновлюється, швидкість потоку знову набуває значення, яке мала на граници кавітації (рисунок 3). Частка повітря, яке виділилось, настільки мала (десятої частки відсотка), що це не впливає на швидкість течії у межах відновленого потоку.

Каверни з повітрям потрапляють до зони відновлення статичного тиску і починають інтенсивно захлопуватись. Вільне повітря у бульбашці раптово перходить у робочу рідину. Струмінь рідини у момент замикання каверни набуває прискорення, і відбувається співударення сусідніх об'ємів рідини одне по одному, що супроводжується значними пульсаціями тиску в об'ємі рідини, що протікає через насадок, а також локальними збільшеннями тиску і температури рідини у мікрооб'ємах.

На зразі насадка Вентурі, який встановлено у циліндричному каналі, виникає застійна зона, яка відбувається

внаслідок нерівномірного розподілення поля швидкостей по перерізу каналу. У цій зоні генеруються потужні торцівальні вихрові структури. У центрі даної вихрової структури зосереджено повітря. Вихрові структури відносяться до транзитного потоком, і бульбашки повітря, які містяться усередині вихору, починають захлопуватись, що спричиняє значні збурення тиску рідини у потоці (рисунок 4).

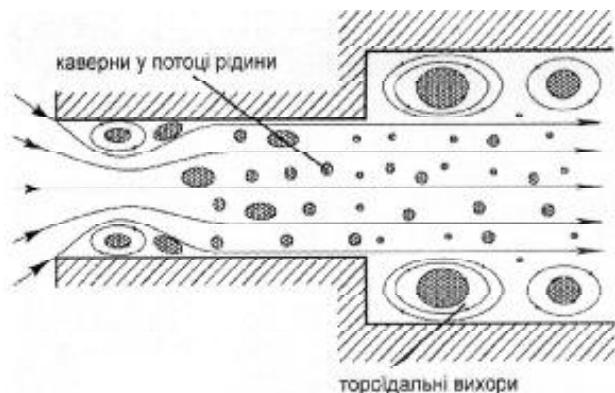


Рисунок 4 — Схема утворення вихрових структур на зразі насадка Вентурі

Характерна особливість кавітаційного витікання рідини полягає у тому, що витрата рідини через дросельний пристрій стабілізується з моменту початку критичного перепаду тиску. На рисунку 5 показано витратні характеристики досліджуваних дросельних пристрій: із конфузорно-дифузорним каналом (крива 1), насадок Борда (крива 2), циліндричний насадок (крива 3), прямоугольний канал (крива 4), діафрагма (крива 5). Вимірювання виконано при постійному входному тиску.

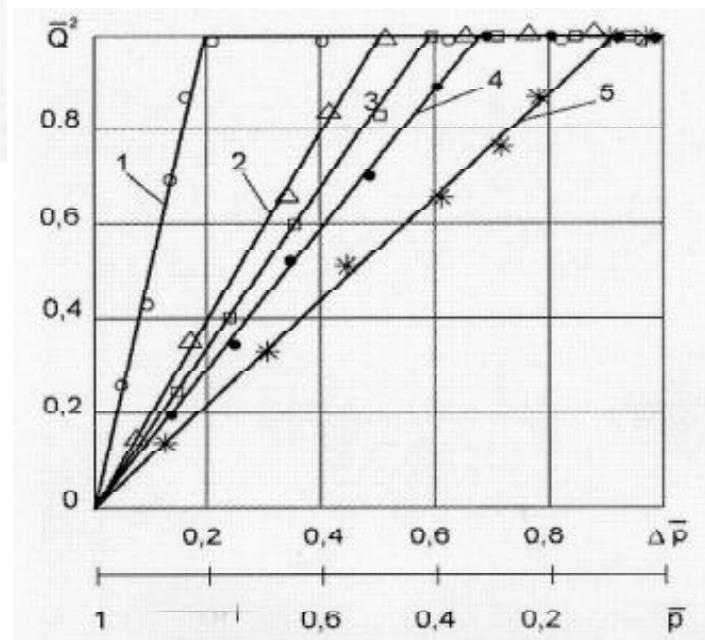


Рисунок 5 — Кавітаційні характеристики перебігу рідини АМГ-10 через дросельні пристрій

- 1 — насадок конфузорно-дифузорного типу;
- 2 — насадок Борда;
- 3 — циліндричний насадок;
- 4 — насадок із прямоугольним каналом;
- 5 — діафрагма

У діапазоні перепадів тиску $0 < \overline{\Delta p} < 0,31$ ($p_{\text{ax}}^{abc} = 1,06 \text{ MPa}$, $Re = 2620$) потік вздовж усього каналу має прозорий вигляд. Але зниження тиску за кавітаційним генератором призводить до викривлення ліній току рідини на вхідній ділянці дросельного каналу і переходу від безвідривної течії до відривної. Застійні області у потоці за вхідними кромками стають видимими при $Re > 2620$. У об'ємі застійних областей малими бульбашками газу виділяються вихорі. Перші розриви суцільності у потоці виникають при перепаді тиску $\overline{\Delta p} = 0,58$ ($Re = 4855$). Картину течії, що відповідає початку кавітації показано на рисунку 6. Зйомку виконано у відзеркаленому світлі із експозицією $f_e = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

Перебудова у структурі потоку, що проявляється у виникненні на стінках каналу за вхідними кромками бульбашок газу, відбувається при $\overline{\Delta p} = 0,64$. Вихровими течіями бульбашки переміщуються вздовж каналу і виносяться потоком. Із збільшенням перепаду тиску до $\overline{\Delta p} = 0,70$ окремі розриви суцільності зливаються і створюють приєднані каверни.

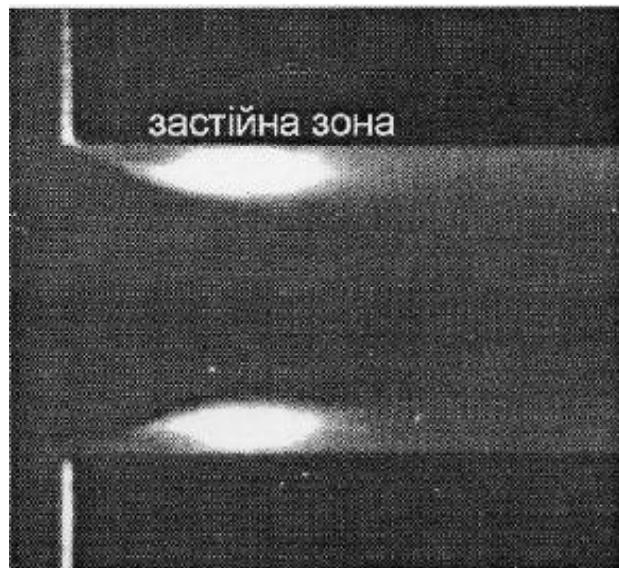


Рисунок 6 — Утворення застійних зон у потоці рідини

$\overline{\Delta p} = 0,58$; збільшення 23-кратне

У момент зародження кавітації приєднані каверни є нестационарними. Енергії потоку не вистачає для стійкого відриву струменя від стілок каналу, що викликає періодичне руйнування каверн зворотними течіями. Із змінами приєднаних каверн у ядрі потоку виникають розриви у вигляді факелів, що відносяться течію. При перепадах тиску $\overline{\Delta p} = 0,70$ ($Re = 5425$) приєднані каверни набувають стійкості, а потік поміж ними розмивається фажелоподібними прошарками.

Потік залишається суцільним тільки на вхідній ділянці. У діапазоні перепадів тиску $\overline{\Delta p} = 0,71 - 0,90$ протяжність зони кавітації збільшується при незмінній її

структурі. На рисунку 7 показано динаміку розвитку кавітаційної зони за плоским дроселем.

У діапазоні ступеня розвитку кавітації $0,94 > \overline{\Delta p} > 0,70$ спостерігається режим розвинутої кавітації у дросельному каналі (приєднана каверна замикається на стінках дроселя). У зливному каналі спостерігається утворення вихрових структур, які візуалізуються газовою фазою. Пониження протитиску сприяє розповсюдженням кавітаційної зони по потоку і збільшенню діаметрів вихорів. Не спостерігається витікання гомогенного двофазного потоку. Кавітаційна зона являє собою сукупність каверн, що взаємодіючи переміщуються по потоку. Кавітація у самому дросельному каналі є джерелом зародків каверн у вигляді бульбашок нерозчиненого повітря.

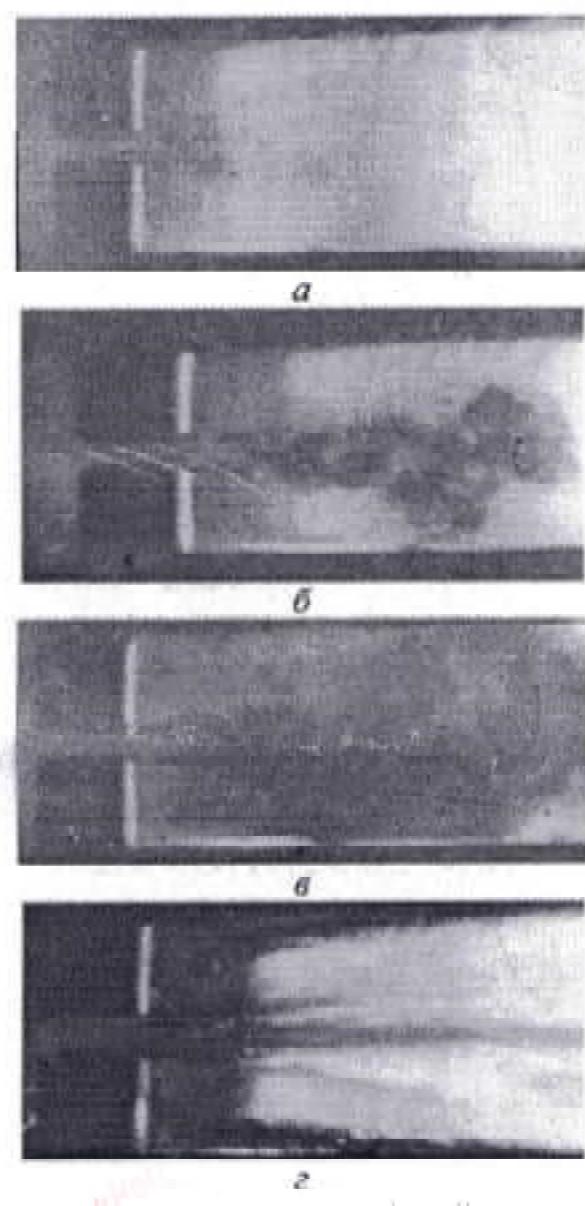


Рисунок 7 — Структура кавітаційної зони за прямокутним дроселем (а — $\overline{\Delta p} = 0,71$; б — $= 0,80$; в — $= 0,90$; г — $= 0,98$)

Суперкавітаційний режим витікання (рисунок 7, *г*) відбувається при відносному перепаді тиску $\overline{\Delta p} > 0,94$. Приєднана каверна виходить за межі дросельного каналу, і у зливному каналі спостерігаються процеси розвитку і руйнування каверн, що персміщуються, а також вентиляція приєднаної каверни аналогічно розвинutoї кавітації у дросельному каналі.

Встановлено внаслідок аналізу кінограм, що на початковій стадії кавітації ($\overline{\Delta p} = 0,58 - 0,69$) частота виникнення каверн коливається у межах від 10 до 100 $k\Gamma\mu$. Із пониженням протитиску кількість бульбашок у зоні кавітації зростає. При дистальному розгляді зображені зони кавітації притягають до себе увагу специфічний характер деформації каверн у процесі росту і руйнування. Форма каверн в усіх випадках відрізняється від сферичної і не повторюється.

Особливістю розвинутих стадій кавітації є те, що поряд із квазістійкими приєднаними кавернами у потоці виникають каверни, що рухаються, несферичної форми. При візуальному спостереженні каверни, що рухаються, мають вигляд факелоподібних прошарків *Б*, що розмивають потік поміж приєднаними кавернами *А* (рисунок 8, *б*). Струмінь рідини, що відривається на входних кромках дроселя, має додатковий розрив у шарі, що розділяє потік і приєднані каверни. У фазі росту спостерігається одночасне витягування каверни по потоку і зростання її поперечного перерізу. Максимальна довжина такої каверни досягає довжини кавітаційної зони, а потік може розірватись по всьому живому перерізу. Внаслідок цього кашал дроселя періодично перекривається парогазовими пробками. Причому дані парогазові пробки є вихровими структурами (рисунок 8, *а*, *б*).

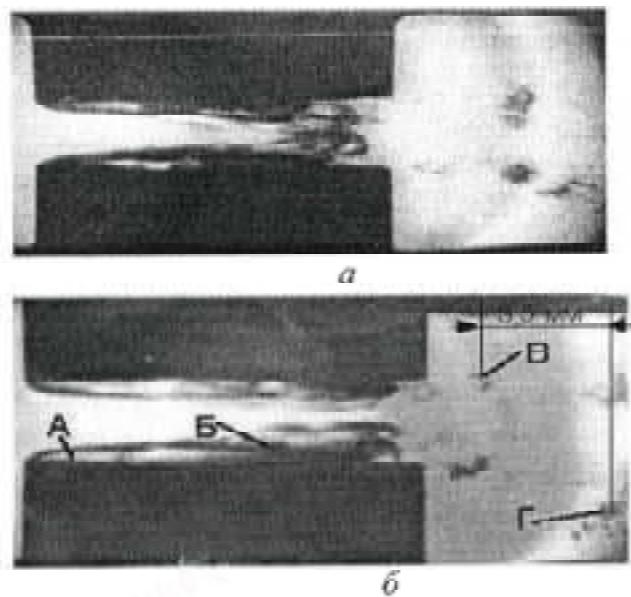


Рисунок 8 — Вихрові структури у зоні відновленого тиску: *а* - $\overline{\Delta p} = 0,75$; *б* - $\overline{\Delta p} = 0,76$

У дросельному каналі утворюється два вихори, які рухаються у напрямку зливу. Дані вихори утворюються внаслідок того, що каверни, рухаючись у область відновленого тиску, починають деформуватись. Деформація відбувається із хвоста каверн. Хвіст скорочується, збільшуються поперечні розміри каверн, виникає нерівномірне поле швидкостей у дросельному каналі. У дросельному каналі насадка має місце низький тиск, тому вихрові структури у ньому за рахунок свого обертання відцентровою силою зрівноважують тиск на виході насадка. Режим течії рідини набуває снарядного характеру (рекалізується дискретна течія). Частота перескриття газовими пробками проходного перерізу струменя становить $5 k\Gamma\mu$ для $\overline{\Delta p} = 0,81$.

Аналіз фотознімків кавітаційної зони дозволяє зробити певні висновки.. Частота виникнення каверн складає 10–30 $k\Gamma\mu$. При спливанні струменя до області відновленого тиску спостерігається утворення значних вихрових структур. Причому при збільшенні протитиску кавітаційна зона виходить за межі дросельного каналу (рисунок 9 *а*, *б*). Це є наслідком взаємодії струменя, що має значну швидкість, із рідиною, яка спливає в області відновленого тиску.

Оскільки струмінь має більшу швидкість, ніж рідина у зливному каналі, то спостерігається перівтомірний розподіл швидкостей по поперечному перерізу зливного каналу. Це сприяє утворенню вихрових структур. У центрі вихору спостерігаються бульбашки повітря, які захлопуються у зливному каналі, що спричиняє пульсацію тиску. Частота захлопування вихрових структур у зливному каналі залежить від значення протитиску і швидкості струменя. Так для $\overline{\Delta p} = 0,75$ частота становить від 8 до 12 $k\Gamma\mu$.

У випадку розвинутої кавітації у дросельних каналах реалізується течія із додатковим звуженням і розпадом струменя на окремі об'еми. Внаслідок додаткового стиснення і подрібнення на окремі блоки потік у межах кавітаційної зони має імпульсне прискорення, а потім гальмується.

Встановлено характер розповсюдження кавітаційного факела по довжині дросельних каналів різних типів. При вишикнені кавітації у трубі Вентурі спостерігається поступове розповсюдження кавітації по довжині пропускного каналу. Причому з моменту стабілізації втрати відбувається стрибкоподібне зменшення тиску в контрольних перерізах труби Вентурі. І навпаки, у насадці Вентурі спостерігається миттєве розповсюдження кавітації на всю довжину дросельного каналу. З моменту стабілізації втрати виникає стрибкоподібне зменшення тиску в середній кашалі.

На основі проведених досліджень було побудовано фізичну модель кавітаційних коливань тиску. Вона базується на використанні теореми Борда, що обґрунтуеться тим, що в її основу покладено теорему імпульсів, використання якої доцільно і у випадку руху дискретних мас рідини. Припускаємо, що границі кавітаційної зони ма-

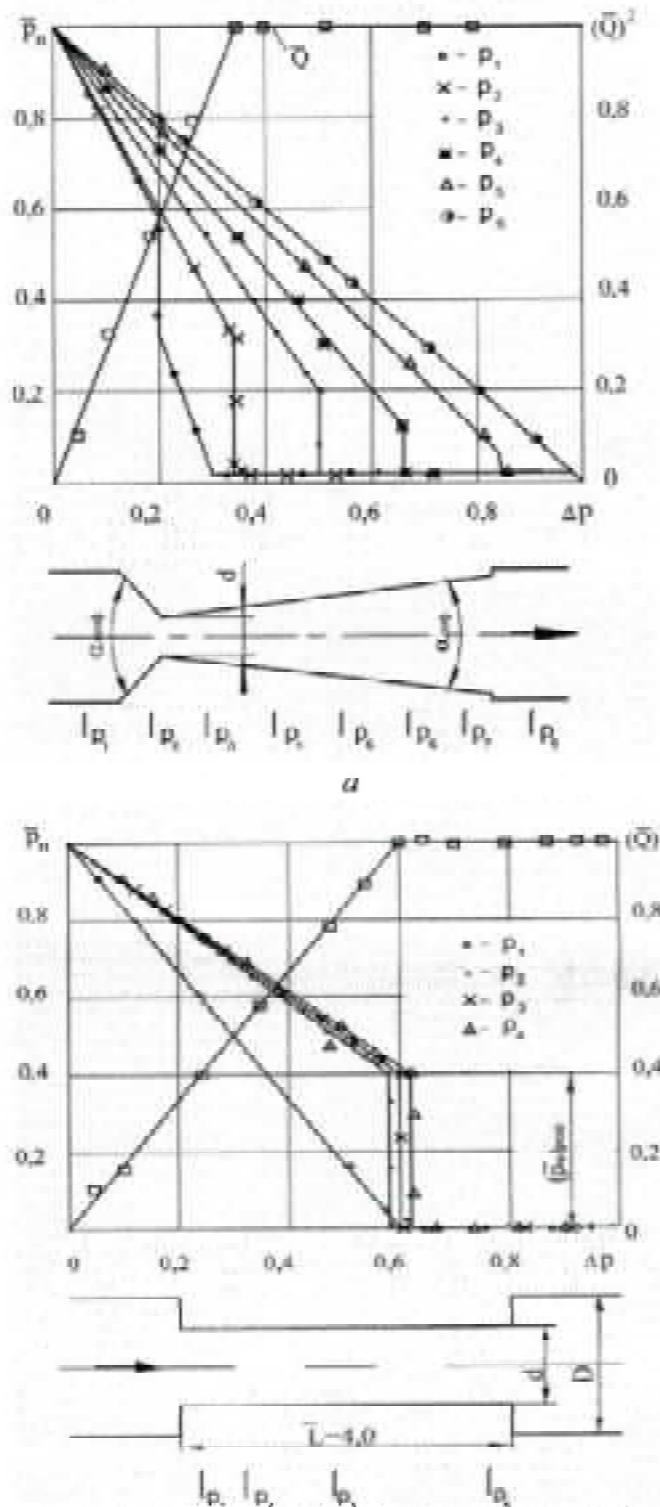


Рисунок 9 — Кавітаційна характеристика і розподіл тиску у дросельних пристроях при кавітаційному спливанні рідини:
а — труба Вентурі; б — насадок Вентурі

ють вигляд плоских перерізів. Перерізи для запису рівнянь позначені відповідно 1-1 та 2-2 (рисунок 3).

Суцільність рідини до перерізу 1-1 ще не порушується, а в перерізі 2-2 повторно відновлюється. В усіх точках кавітаційної зони тиск дорівнює тиску порога кавітації $p_{\text{кав}}$.

Швидкості течії рідини на границях зони кавітації $V_{\text{ст}}$ і $V_{\text{стаб}}$ розглядаються як середньовитратні і визначаються із рівняння витрати. За критичних режимів кавітації середня швидкість течії дискретних об'ємів у зоні кавітації збільшується від $V_{\text{ст}}$ до V^* , а в перерізі 2-2 потік гальмується від V^* до $V_{\text{стаб}}$. Експериментально миттєві значення середньої швидкості визначаються після розшифрування кінограм.

У міру збільшення перепаду тиску збільшується протяжність зони кавітації і ступінь прискорення потоку. Таким чином різниця тисків $P_{\text{вих_кр}} - P_{\text{вих}}$ характеризує ступінь двофазності потоку і ступінь прискорення дискретного струменя.

Прирівнюючи кількість руху рідини у відсіку поміж перерізами 1-1 і 2-2 (рисунок 3) імпульсу головного вектора поверхневих сил, отримаємо

$$\delta p_m = \rho a(\bar{p}) V_{\text{стаб}} \left(\frac{V^*}{V_{\text{стаб}}} \Delta \bar{\omega} - 1 \right),$$

де $a(\bar{p})$ — швидкість розповсюдження пружної хвилі у рідині; ρ — густина рідини; $\Delta \bar{\omega}$ — ступінь дискретності струменя; δp_m — розмах кавітаційних коливань тиску.

$$a = \frac{a_{\text{ріл}}}{\sqrt{1 + \frac{\bar{Q}_{\text{п.г.}} \rho a_{\text{ріл}}^2}{k p}}};$$

де $a_{\text{ріл}}$ — швидкість поширення пружної хвилі у рідині;

$\bar{Q}_{\text{п.г.}}$ — об'ємний вміст парогазової фази, приведений до атмосферних умов; ρ — густина рідини; k — показник адіабати; p — тиск на вході у дросельний пристрій.

Розгин струменя створює умови для генерування потужних ударних імпульсів в потоці за кавітаційною зоною. Максимальне значення швидкості розгону кавітаційного струменя для $p_{\text{вх}} = 20 \text{ MPa}$ при $\Delta \bar{p} = 0,99$

складає $V^* = 238 \text{ м/с}$. За таких умов при раптовому розширенні з певною періодичністю генеруються потужні пульсації тиску. Демпфування пульсацій тиску відбувається за рахунок асрації потоку по мірі його розгону. Вміст повітря по мірі зростання перепаду тиску збільшується. Швидкість поширення ударної хвилі може із-за аерації

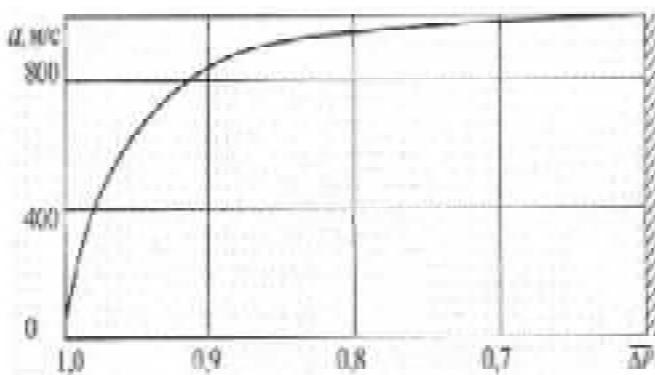


Рисунок 10 — Теоретична залежність швидкості розповсюдження пружної хвилі при кавітаційному витіканні від відносного перепаду тиску

суттєво зменшиться (рисунок 10).

Представлена модель дискретного кавітаційного потоку, який має місце при кавітаційних режимах течії у дроселях, дозволяє пояснити широкий (від 40 Гц до 200 кГц) спектр кавітаційних коливань тиску.

Дросельні насадки, що працюють у кавітаційному режимі створюють широкий (від 40 Гц до 20 кГц) спектр кавітаційних коливань тиску. На рисунку 11 показано осцилограму коливань тиску за конфузорно-дифузорним насадком, що працює у кавітаційному режимі.

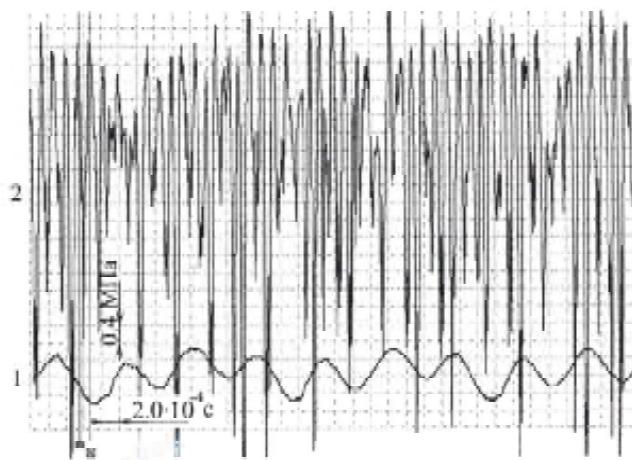


Рисунок 11 — Кавітаційні коливання тиску за конфузорно-дифузорним насадком

($\overline{\Delta p} = 0,95$; $p_{\text{вх}} = 10 \text{ МПа}$; $\delta p_m = 8,66 \text{ МПа}$); канал 1 — насосні пульсації тиску; канал 2 — пульсації тиску за насадком (датчик встановлено на відстані 18 см від зりзу насадка)

Експериментальні дослідження даного насадка проводились при тиску живлення 10 МПа. Кавітаційні пульсації тиску показані на каналі 2, канал 1 фіксус насосні пульсації. Кавітаційні коливання тиску за дросельним насадком на відміну від насосних пульсацій мають негармонійний характер, хоча у них можна виділити несучу гармоніку, внаслідок негармонійності коливань. Розмах кавітаційних коливань тиску оцінюється „подвійною амплітудою”, під якою мається на увазі величина

$$\delta p_i = p_{\max} - p_{\min}.$$

Плунжерна частота насоса складає 442 Гц. Максимальний розмах пульсууючого тиску складає 8,2 МПа при тиску живлення $p_{\text{вх}} = 10 \text{ МПа}$. Цей максимум припадає на відносний протитиск $\overline{\Delta p} = 0,85 - 0,95$. Максимум „подвійної амплітуди” пульсацій ударного тиску для конфузорно-дифузорного генератора на режимі $\overline{\Delta p} = 0,95$ припадає на частоти від 2–5 кГц (рисунок 12).

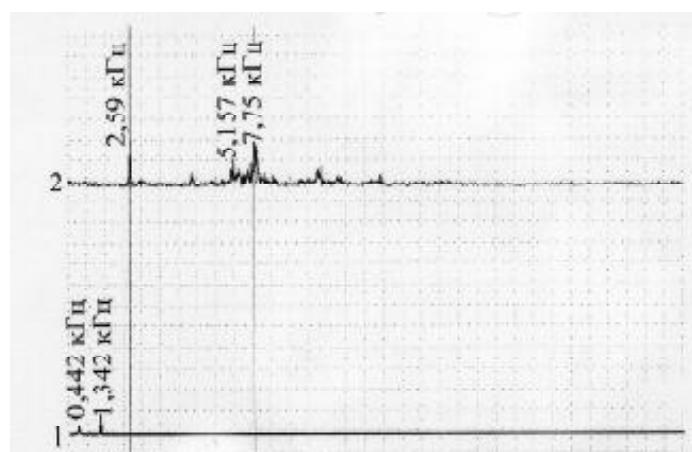


Рисунок 12 — Спектральні характеристики конфузорно-дифузорного насадка ($\overline{\Delta p} = 0,95$; $p_{\text{вх}} = 10 \text{ МПа}$)

На рисунку 12 наведено спектр насосних коливань тиску (1) і спектр кавітаційних коливань тиску генератора (2). Як було з'ясовано вище, спектр кавітаційних коливань (пульсацій) тиску має негармонійний характер [2] на відміну від насосних пульсацій. На спектрі насосних пульсацій спостерігаються два максимуми, які відповідають частотам 442 Гц і 1342 Гц.

Спостерігається наступна тенденція: із зменшенням безрозмірного перепаду тиску енергетичні максимуми амплітуд спочатку збільшуються ($\overline{\Delta p} = 0,90$), потім починають зменшуватись ($\overline{\Delta p} = 0,80 - 0,60$), причому частоти енергетичних максимумів із збільшенням протитиску зміщуються у бік високих частот. Зменшення інтенсивності енергетичних максимумів кавітаційних коливань тиску при зменшенні безрозмірного перепаду тиску по-

яється тим, що із зростанням протитиску зменшується перепад тиску на вході і виході дросельного пристроя. Це призводить до зменшення швидкості витікання рідини і до зменшення кавітаційного факела. Із збільшенням протитиску кавітація „придушується”.

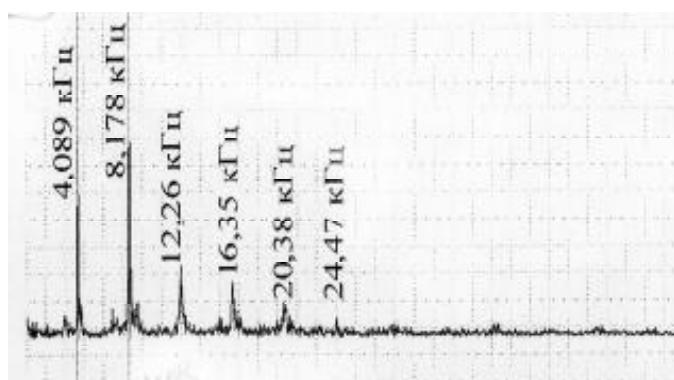


Рисунок 13 — Спектральні характеристики конфузорно-дифузорного насадка ($\overline{\Delta p} = 0,925$; $p_{\text{вх}} = 10 \text{ МПа}$)

На рисунку 13 показано спектр кавітаційних коливань тиску генератора типу конфузорно-дифузорний насадок. Максимуми спектру відповідають частотам 2,929 кГц; 4,934 кГц; 7,812 кГц; 15,47 кГц; 18,4 кГц; 21,02 кГц. Несучими частотами є частоти 4,934 кГц і 7,812 кГц. При збільшенні протитиску збільшується інтенсивність максимумів у високочастотній області спектрограми.

Дану тенденцію представлено на рисунку 14. Низькочастотна складова кавітаційних коливань тиску (400–800 Гц) є наслідком модуляції плунжерної частоти насоса із частотою сходу дискретних мас рідини. Високочастотна складова спектра (1–10 кГц) кавітаційних коливань тиску формується, здебільшого, в результаті співударянь дискретних мас рідини із загальмованим потоком рідини (так званий „саарядний” рух рідини). „Саарядний” рух дискретного струменя створює потужні пульсації тиску, їх амплітуда сягає 0,5–0,8 тиску живлення генератора. При співударяньї дискретних мас рідини виникає захлопування мікрокаверн, що знаходяться у об'ємі рідини (з частотою 20 кГц і вище).

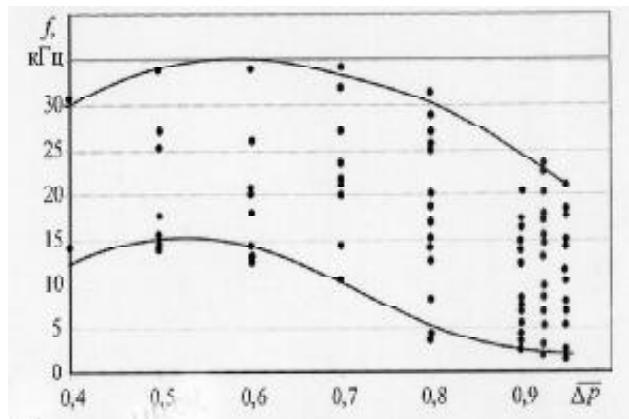


Рисунок 14 — Залежність частоти енергетичних максимумів від безрозмірного перепаду тиску для конфузорно-дифузорного насадка ($p_{\text{вх}} = 10 \text{ МПа}$)

З метою встановлення оптимального режиму роботи насадка, при якому спостерігаються максимальні значення тиску за генератором при коливаннях ударного характеру, було отримано наступну характеристику дросельного насадка — залежність величини безрозмірного ударного тиску $\overline{\delta p}_m$ від відносного перепаду тиску $\overline{\Delta p}$ (рисунок 15).



Рисунок 15 — Залежність розмаху безрозмірного тиску $\overline{\delta p}_m$ від безрозмірного перепаду тиску $\overline{\Delta p}$ для конфузорно-дифузорного насадка ($p_{\text{вх}} = 10 \text{ МПа}$)

Із аналізу кривих можна зробити висновок, що максимуми амплітуд коливань тиску приходяться на відносний перепад тиску, що знаходитьться у межах 0,85–0,95.

Про ефективність дросельних пристрій як кавітаційних генераторів коливань тиску можна судити за їх енергетичними витратно-перепадними характеристиками

$$(\bar{Q})^2 = f(\bar{p}, \bar{\Delta p}),$$

де $(\bar{Q})^2 = \left(\frac{Q}{Q_{\text{позр}}} \right)^2$ — квадрат безрозмірної витрати рідини

чи, що проходить через дросельний пристрій; $\bar{\Delta p}$ — відносний перепад тиску на дросельному пристрої (рисунок 16).

Із аналізу наведених снагестичних витратно-перепадних характеристик насадків різних типів випливає, що кавітація відбудеться раніше у насадка конфузорно-дифузорного типу, потім у насадка Борда, а далі у інших насадків. З цього можна зробити висновок, що насадки конфузорно-дифузорного типу ефективніше перетворюють снагство потоку в кавітаційні коливання тиску, ніж інші дросельні пристрії. Найнижчу кавітаційну потужність має діафрагма, оскільки кавітація у неї відбувається при найбільших значеннях $\bar{\Delta p}$.

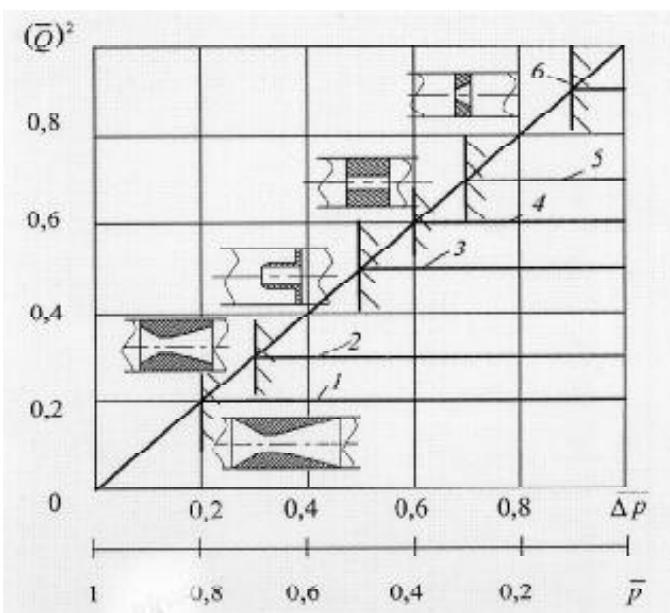


Рисунок 16 — Енергетичні витратно-перепадні характеристики $(\bar{Q})^2 = f(\bar{p}, \bar{\Delta p})$ дросельних пристрій (робоча рідина — АМГ-10):

- 1 — насадок конфузорно-дифузорного типу;
- 2 — насадок конфузорно-дифузорного типу укорочений;
- 3 — насадок Борда;
- 4 — циліндричний насадок;
- 5 — насадок із прямокутним каналом;
- 6 — діафрагма

На рисунку 16 показано значення стабілізованих витрат, що дозволяє оцінювати снегрію, яка підводиться до потоку рідини.

Енергія, що підводиться до потоку, із зростанням $\bar{\Delta p}$ посад критичної величини витрачається на утворення кавітаційних розривів супільності. Подальше збільшення перепаду понад $\bar{\Delta p}_{kp}$ призводить до збільшення довжини кавітаційного факела при постійній витраті рідини. Автомодельність отриманих характеристик за числом Рейнольдса відбувається з моменту досягнення $Rc = 8000$.

Енергетичні характеристики генераторів можуть розраховуватись за значеннями коефіцієнтів витрати μ_1 і μ_2 . Енергія, яка підводиться до потоку при кавітаційному витіканні рідини, складає

$$N_{\text{під}} = p_{\text{вх}} Q_{\text{stab}},$$

де Q_{stab} — стабілізована кавітаційна витрата.

Із урахуванням того, що при кавітації потужність потоку, що витрачається, складає

$$N_{\text{кав}} = p_{\text{вх}} (1 - \bar{\Delta p}_{kp}) Q_{\text{stab}},$$

а при нульовому протитиску витрачається вся снегрія, частина кавітаційної енергії дорівнює

$$\frac{N_{\text{кав}}}{N_{\text{під}}} = \frac{p_{\text{вх}} (1 - \bar{\Delta p}_{kp}) Q_{\text{stab}}}{p_{\text{вх}} Q_{\text{stab}}} = 1 - \bar{\Delta p}_{kp}.$$

На підставі розрахунків за даною формулою встановлено, що в КГКТ з насадком Вентурі для розвитку і підтримки зони кавітації може використатися 43% снегрії потоку, у генератора з конфузорно-дифузорним насадком скороченому типу — 62% енергії потоку, а у КГКТ з повнорозмірним конфузорно-дифузорним насадком — від 62% до 89% .

Виходячи із енергетичних характеристик дросельних пристрій, можна зробити висновки щодо застосування кавітаційних насадків. Дросельні пристрій типу насадка Вентурі і конфузорно-дифузорний насадок скороченого типу доцільно використовувати для очищення поверхонь від забруднень, ерозійних випробувань конструкційних матеріалів.

Повнорозмірний конфузорно-дифузорний насадок доцільно використовувати для збудження високочастотних коливань тиску у об'ємі рідини, а також для диспертування і змішування фракцій, які за нормальніх умов не змішуються.

Висновки

Встановлено дві характерні форми розриву рідини при кавітації у дросельних пристроях гіdraulічних систем: каверни, що переміщуються, і приєднані каверни. При розвинутій кавітації каверни, що переміщуються, додатково стискають потік і дроблять його па частини. По цій причині швидкість перебігу рідкої фази у зоні кавітації імпульсно змінюється. У фазі росту каверни, що переміщуються, потік прискорюється, у момент її руйнування — гальмується.

При кавітації відбувається поліл струменя на окремі блоки і реалізується „снарядний” режим спливання рідини. Експериментально підтверджено, що кавітаційні коливання тиску, що генеруються дросельними пристроями, є наслідком декількох процесів, що проявляються на макро- і мікрорівнях.

Низькочастотна складова кавітаційних коливань тиску (400–800 Гц) є наслідком модуляції плунжерної частоти насоса із частотою сходу дискретних мас рідини. Високочастотна складова спектру (1–10 кГц) кавітаційних коливань тиску формується, в основному, в результаті співударянь дискретних мас рідини із загальмованім потоком рідини (так званий „снарядний” рух рідини).

Максимальний рівень пульсацій тиску при кавітаційному витіканні складає $0,8 p_{\text{вх}}$. Із збільшенням протитиску частота кавітаційних коливань тиску зміщується до високочастотної області.

На підставі аналізу існуючих типів дросельних пристрій та їх витратно-перепадних характеристик визначено, що у насадку Вентурі для розвитку і підтримки зони кавітації може використатися до 43% снегрії потоку, у конфузорно-дифузорного насадку вкороченого типу — до 62% снегрії потоку, а у повнорозмірному конфузорно-дифузорному насадку — від 62% до 89% снегрії потоку.

На основі дослідження запропоновано фізичну модель генерування кавітаційних коливань тиску дросельними пристроями гідропривода, яка базується на імпульсному гальмуванні дискретних об'ємів рідини.

Література

1. Пилипенко, В.В. Кавитационные колебания / В.В. Пилипенко. — К.: Наукова думка, 1989. — 316 с.
2. Глазков, М.М. Модель кавитационной зоны дроссельных устройств гидропривода / М.М. Глазков, С.В. Пилипенко, Н.Г. Макаренко // Сб. Тез. док. НТК Гидравлика и

гидропривод машин, автоматов и промышленных роботов в машиностроении. 20–22 сентября. — К., 1990. — С. 24—25.

3. Oba, R. Stochastic behavior (randomness) of acoustic pressure pulses in the near subcavitating range / R. Oba, X. Miyakura // Intern. Journal. — 1987. — P. 581—586.

4. Ивченко, В.М. Гидродинамика многофазных жидкостей. Кавитация. Учебное пособие. / В.М. Ивченко. — Красноярск: КПИ. — 1980. — 91 с.

Надійшла 14.12.2012 року