

УДК 62-82:535.528

DOI: 10.18372/0370-2197.1(110).20932

Т.В. ТАРАСЕНКО

Київський авіаційний інститут, Україна

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРОСЕЛЬНИХ ГЕНЕРАТОРІВ КАВІТАЦІЇ ДЛЯ ЕРОЗІЙНИХ ВИПРОБУВАНЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Практичний інтерес для науковців і інженерів гідромашинобудування становить розроблення ефективних методів прискорених ерозійних випробувань конструкційних матеріалів в умовах, максимально наближених до реальних режимів гідродинамічної кавітації. У роботі досліджено характеристики дросельних гідродинамічних генераторів кавітаційних коливань тиску та їх придатність для проведення ерозійних випробувань конструкційних матеріалів.

Метою дослідження є встановлення ефективних режимів роботи дросельних генераторів кавітації, та оцінка впливу режимів роботи генераторів на інтенсивність і локалізацію кавітаційної ерозії.

Експериментальні дослідження виконано на гідравлічному стенді при тисках до 25 МПа з використанням дросельних пристроїв різних типів (циліндричний насадок, конфузорно-дифузорний насадок, насадок Борда, прямокутний канал, діафрагма). Як модельні матеріали застосовано сплави Д16АТВ та АМцМ, що характеризуються підвищеною чутливістю до кавітаційного руйнування. Вимірювання швидкозмінних кавітаційних коливань тиску здійснювались у широкому частотному діапазоні з одночасною оцінкою втрати маси зразків.

Встановлено, що дросельні генератори кавітації формують стохастичні кавітаційні коливання тиску з широкою смугою частот від сотень герц до десятків кілогерц, амплітуда яких співрозмірна з тиском живлення. Показано, що зі збільшенням безрозмірного протитиску розмах кавітаційних коливань зменшується, а енергетичні максимуми спектра зміщуються у височастотну область, що пов'язано з домінуванням колапсу дрібних каверн. Визначено оптимальні відстані від дросельного генератора до поверхні зразка та режими роботи, за яких досягається максимальна інтенсивність кавітаційної ерозії. Показано, що циліндричні та конфузорно-дифузорні насадки забезпечують найефективніше перетворення енергії потоку в енергію кавітаційних коливань тиску.

Отримані результати підтверджують доцільність використання дросельних гідродинамічних генераторів кавітації для ерозійних випробувань конструкційних матеріалів і дозволяють наблизити лабораторні дослідження до реальних умов експлуатації елементів гідравлічних систем.

Ключові слова: гідравлічний привод, дросельний пристрій, кавітаційна ерозія, гідропривод, кавітаційні коливання тиску.

Вступ. Практичний інтерес для науковців становить пошук стійких до кавітаційної ерозії конструкційних матеріалів, що використовуються у гідромашинобудуванні. Дослідження кавітаційної ерозії здійснюються експериментально за допомогою генераторів кавітації. Виходячи із типів кавітації – вібраційної, ультразвукової і гідродинамічної, розрізняють відповідні генератори кавітації – вібраційні, ультразвукові і гідродинамічні. Ультразвукові генератори кавітації (сонореактори, ультразвукові ванни та зонди) є важливими інструментами сучасної хімічної технології, екології, харчової промисловості та

медицини. Принцип їхньої дії ґрунтується на виникненні бульбашок у рідині під дією ультразвукових хвиль та їх колапсі, що супроводжується виникненням локальних високих тисків і температур, гідродинамічних потоків та ін. Це дозволяє суттєво підвищувати ефективність фізико-хімічних процесів та відкриває широкі перспективи застосування у різних галузях.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. До переваг ультразвукових генераторів кавітації можна віднести те, що такі генератори мають фіксовану частоту і амплітуду коливань тиску і їх можна широко використовувати для ерозійних випробувань конструкційних матеріалів [1]. Мають високу стандартизованість і відтворюваність. ASTM G32 забезпечує чітку методику, що робить результати порівнюваними між лабораторіями, швидкість в отриманні результатів випробувань, випробування дають помітну ерозію за відносно короткий час (години – десятки годин), що дозволяє ранню селекцію матеріалів/покриттів [2]. Але ультразвукові генератори кавітації мають і недоліки. Насамперед до недоліків ультразвукових генераторів кавітації можна віднести низьку відповідність реальним умовам протікання гідродинамічної кавітації. У реальних турбінних, насосних чи дросельних потоках кавітаційні бульбашки формуються за інших гідродинамічних умов.[3]. Ультразвук створює кавітацію переважно поблизу торця сонотрона. При цих умовах кавітаційна ерозія буде відрізнятися від ерозії створеної кавітаційною хмарою у проточній частині агрегату. Тому результати, отримані за допомогою ультразвукової кавітації слід трактувати як відносну кавітаційну стійкість, а не пряму імітацію умов кавітаційної ерозії в проточній частині.[4].

Результати кавітаційних досліджень залежать від геометрії та налаштування ультразвукового генератора кавітації. Зазор між торцем сонотрона і дослідним зразком критично впливає на інтенсивність кавітаційної ерозії. Діаметр і форма торця сонотрона, амплітуда коливань та резонансні умови можуть змінювати картину кавітаційних руйнувань. Невелике відхилення в налаштуванні ультразвукового генератора кавітації призводить до значного розкиду результатів дослідження між лабораторіями [5].

Також, до недоліків ультразвукових генераторів кавітації відноситься мала локалізація зони кавітаційної ерозії. Кавітаційна ерозія відбувається на дуже обмеженій ділянці (площа кілька мм²). При цьому важко екстраполювати дані експерименту на великі площі (деталі чи вузли) [6]. Також, має місце можливість механічного пошкодження частини сонотрона чи бустера. При великих амплітудах коливань або при неправильному охолодженні сонотрони і бустери руйнуються внаслідок втомного пошкодження наконечників. Заміна пошкоджених деталей потребує додаткових витрат на обслуговування [7]. Ще одним недоліком ультразвукових генераторів кавітації слід відмітити високу чутливість ультразвукових генераторів кавітації до умов середовища. Ступінь дегазації робочої рідини, температура, домішки та кількість нерозчинених газів у рідині, надлишковий тиск сильно впливають на агресивність кавітації.[8]. Ультразвуковим генераторам кавітації притаманна проблема у масштабуванні результатів ерозійних випробувань. Навіть при використанні стандартних умов важко відразу напряму співвіднести отримані лабораторні дані з довговічністю у великих масштабах. Складність вибору коректних коефіцієнтів переходу від лабораторної моделі до реальних умов [9] і енергетичні обмеження у використанні ультразвукових генераторів кавітації великої потужності. Велике енергоспоживання і велика собівартість ультразвукової установки великої

потужності, залежність від електричної енергії. Ультразвукові генератори працюють на одній фіксованій частоті, інші режими кавітації - низькочастотна складова в межах цього методу залишається не досліджено [10].

Гідродинамічна кавітація — явище утворення, росту та швидкого колапсу парогазових каверн у потоці рідини при локальному падінні тиску або при обертанні елементів (ротори, статорні конструкції). Колапс бульбашок створює інтенсивні місцеві градієнти тиску, температури й швидкостей (мікрострумені), що зумовлює механічні та хімічні ефекти, корисні для інтенсифікації процесів: деградації забруднювачів, руйнування металів і неметалів, емульгування, підвищення масообміну тощо [11].

До гідродинамічних генераторів кавітації відносяться пристрої, які створюють кавітацію за рахунок зменшення тиску у звужених перерізах проточної частини (дросельні генератори кавітації), у системах «статор-ротор», та ін., без використання ультразвуку чи акустичних хвиль. У якості дросельних генераторів кавітації можуть виступати гідравлічні насадки різних конфігурацій (насадок Вентурі, насадок Борда, трубка Вентурі, конфузorno-дифузornoний насадок та ін.), які працюють в кавітаційному режимі. При протіканні рідини через вузькі перерізи генератора, у потоці рідини знижується статичний тиск до тиску порогу кавітації і починають утворюватись порожнини (каверни). Каверни, потрапляючи у область відновленого тиску колапсують (захлопуються), утворюючи ударні хвилі і кумулятивні мікрострумені, які діють на поверхню дослідного зразка і ініціюють кавітаційну ерозію. До переваг таких генераторів слід віднести відносну простоту конструкції і масштабованість. Це полегшує їх виготовлення і експлуатацію та масштабування для лабораторних чи пілотних установок [12]. Гідродинамічні генератори кавітації, маючи просту конструкцію, мають низьку собівартість у виготовленні і експлуатації і як наслідок – низька собівартість випробування на кавітаційну стійкість. Гідродинамічні генератори кавітації можуть використовувати енергію стаціонарної або мобільної гідравлічної системи, зовнішній двигун [13]. Гідродинамічні генератори кавітації мають гнучкість у виборі умов ерозійного випробування. При ерозійних випробуваннях можна змінювати швидкість потоку, температуру, статичний тиск, при цьому мати широку смугу частот кавітаційних коливань тиску. Гідродинамічні генератори кавітації дозволяють створювати кавітацію високої інтенсивності на великій площі, що дозволяє отримати швидку ерозію матеріалу. Використання гідродинамічних генераторів кавітації дає можливість моделювати реальні умови протікання кавітаційної ерозії технологічного обладнання різноманітних агрегатів (насосів, турбін, розподільників), що працюють із частковим виникненням кавітаційних режимів.

До недоліків гідродинамічних генераторів кавітації можна віднести складність контролю локалізації кавітаційної ерозії. Гідродинамічні генератори кавітації дросельного типу при роботі мають значні втрати енергії потоку (втрати напору), тому для забезпечення їх роботи необхідно використовувати насос високої потужності [14]. Також, слід відмітити, що при роботі гідродинамічних генераторів кавітації можливе ерозійне пошкодження допоміжних елементів гідродинамічного генератора. У цьому випадку слід ретельно контролювати область локалізації кавітаційної ерозії.

Із бібліографічного огляду генераторів кавітації можна зробити висновок, що гідродинамічним генераторам кавітації дросельного типу приділено досить мало уваги, зокрема їхнім характеристикам. Для отримання швидкої ерозії поверхні

необхідно визначити механізм генерування кавітаційних коливань тиску і режим роботи гідродинамічного генератора, який супроводжується максимум ерозії, відстань від генератора до дослідної поверхні, кут натікання кавітаційного струменя та ін. Слід відмітити, що використання гідродинамічних генераторів кавітації для ерозійних досліджень конструкційних матеріалів, дозволяє максимально наблизити лабораторні дослідження кавітаційної ерозії конструкційних матеріалів до реальних умов перетікання кавітаційної ерозії у елементах гідравлічних систем для підвищення ефективності досліджень.

Постановка завдання. Метою даних досліджень було визначення характеристик дросельних генераторів кавітації для їх використання у дослідженнях з визначення кавітаційної стійкості конструкційних матеріалів. Це дасть можливість створити високопродуктивні дросельні генератори кавітації для випробувань на ерозійну стійкість конструкційних матеріалів.

Для досягнення мети вирішувались наступні задачі;

- визначити тип дросельного генератора кавітації для ефективного перетворення енергії потоку рідини у кавітацію.
- дослідити залежність кавітаційних коливань тиску дросельного генератора кавітації від відносного протитиску на виході (режим роботи);
- визначити вплив режиму роботи дросельного генератора кавітації на інтенсивність кавітаційної ерозії;
- дослідити залежність інтенсивності кавітаційної ерозії від фокусної відстані від дослідного зразка до генератора кавітації.

Матеріали та методи досліджень. Для дослідження ерозійних характеристик гідродинамічних генераторів кавітації дросельного типу у якості модельних зразків використовувались круглі шайби із матеріалу Д16АТВ і АМцМ двох типів: з центральним отвором і без отвору, діаметром 25 мм і товщиною від 0,7 до 2,0 мм (рис. 1).

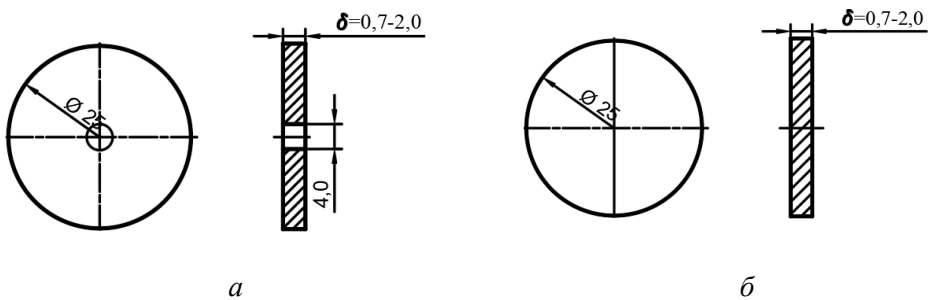


Рис. 1. Дослідні зразки виготовлені із сплаву Д16АТВ і АМцМ для визначення характеристик дросельних генераторів кавітації; а – зразок з центральним отвором; б – зразок без центрального отвору.

Використання сплавів Д16АТВ і АМцМ обумовлено тим, що ці матеріали достатньо м'які і пластичні, вони швидко руйнуються кавітацією, що значно зменшує час проведення експерименту, дозволяє фіксувати кратери від захоплення окремих кавітаційних каверн, що дозволяє оцінювати характер і інтенсивність кавітаційної ерозії.

Дослідження характеристики гідродинамічних генераторів кавітації виконувалось на гідравлічному стенді, представленому на рис.2 . Рідина із

гідралічного баку 3 насосом підкачки 2 подається на регульований насос 1, робоча рідина рухається через зворотній клапан 27 і фільтр 25 до гідродинамічного генератора кавітації 20. Тиск у системі задається переливним клапаном 24. Для гасіння коливань тиску, створюваних насосом використовується гідроакумулятор 26. Контроль тиску на гідродинамічному генераторі кавітації 20 здійснюється манометрами 22, 19 і датчиком швидкозмінного тиску 21, контроль температури здійснюється термометром 23.

Визначення витрати робочої рідини, що протікає через гідродинамічний генератор кавітації здійснюється за допомогою електромагнітного крану 17, який направляє робочу рідину або в мірний бак 15, або через холодильник 16 у гідралічний бак 3. Відкачування робочої рідини із мірного баку 15 здійснюється через дросельний кран 14 насосом відкачування 13.

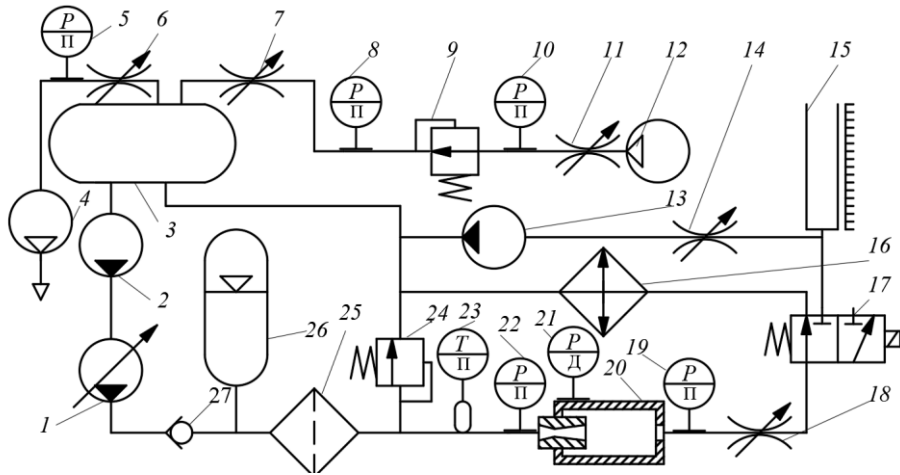


Рис. 2. Принципова схема гідралічного стенда для проведення ерозійних випробувань;

1 – регульований насос; 2 – насос підкачки; 3 – гідралічний бак; 4 – вакуум-насос; 5, 8, 10 – мановакууметри; 6, 7, 11, 14, 18 – дросельні крани; 9 – редукційний клапан; 12 – компресор; 13 – насос відкачування; 15 – мірний бак; 16 – теплообмінник (холодильник); 17 – електромагнітний кран; 19, 22 – манометри; 20 – гідродинамічний генератор кавітації; 21 – датчик швидкозмінного тиску; 23 – термометр; 24 – переливний клапан; 25 – фільтр; 26 – гідроакумулятор; 27 – зворотній клапан.

Для визначення впливу тиску наддуву гідралічного бака 3 на інтенсивність кавітаційної ерозії конструкційних матеріалів (що відповідає реальним умовам протікання кавітаційної ерозії в гідросистемі літального апарату) використано компресор 12. Стиснуте повітря від компресора 12 через дросельний кран 11 потрапляє до редукційного клапана 9, який задає значення тиску повітря у гідралічному баці 3, який контролюється манометром 8. За необхідності вакуумування баку 3, використовується вакуум-насос 4 і мановакууметр 5.

Гідралічний стенд дозволяє проводити випробування на кавітаційну стійкість конструкційних матеріалів при максимальному тиску нагнітання 25 МПа і вимірювати витрату робочої рідини в межах від 10 до 1000 см³/с в діапазоні чисел Рейнольдса від 100 до 10⁵, що відповідає найбільш характерним режимам роботи агрегатів гідралічних систем літальних апаратів. Кавітаційний режим роботи дросельного гідродинамічного генератора кавітації визначається трьома

способами: візуально, використовуючи дросельні насадки із органічного скла; на слух - по зміні тону звуку; за приладами – в момент стабілізації витрати робочої рідини.

Аналіз результатів та обговорення. У якості гідродинамічних генераторів кавітації дросельного типу для дослідження кавітаційної ерозії використовувались такі типи дросельних пристроїв: насадок конфузорно-дифузорного типу, насадок Борда, циліндричний насадок Вентурі, насадок із прямокутним каналом і діафрагма з отвором. Витратно-перепадні характеристики дросельних пристроїв наведено на рис. 3. На витратно-перепадних характеристиках дросельних пристроїв критичний перепад тиску при якому починається кавітація у дросельному каналі насадка визначається зломом похилої ділянки характеристики у горизонтальну ділянку. У критичній точці характеристики перепад тиску на ділянці від входу до стиснутого перерізу потоку стабілізується і витрата рідини перестає залежати від перепаду тиску на насадці, що свідчить про виникнення кавітації. Експериментально отримані витратні характеристики дозволяють оцінювати ефективність перетворення енергії потоку робочої рідини гідравлічної системи у енергію кавітаційних коливань тиску $(\bar{Q})^2 = f(\bar{p}, \Delta\bar{p})$, де $(\bar{Q})^2 = (Q / Q_{\text{кав}})^2$ - квадрат безрозмірної витрати рідини через дросельний пристрій; $\Delta\bar{p}$, \bar{p} – відносний перепад тиску та відносний протитиск на дросельному пристрої. У якості робочої рідини використовувалась рідина АМГ-10, поширена у гідравлічних системах літаків. Діаметри отворів насадків склали 1,5 мм, кут конфузору складав 60° , кут дифузору 11° . Виходячи із витратно-перепадних характеристик дросельних

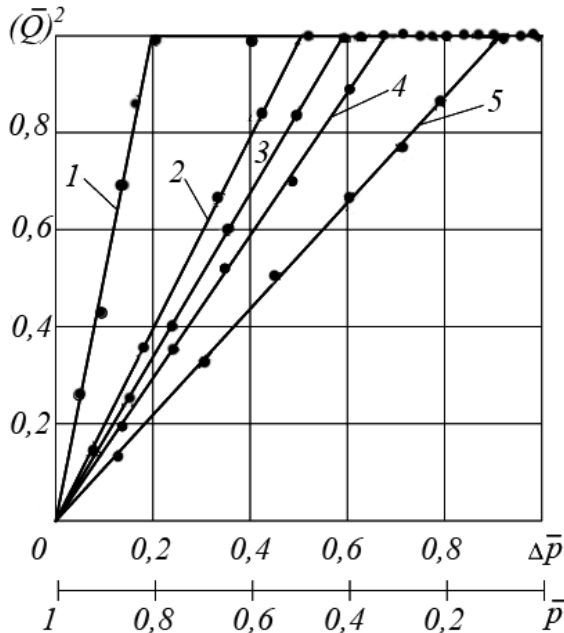


Рис. 3. Витратно-перепадні характеристики дросельних пристроїв; 1 – насадок конфузорно-дифузорного типу; 2 – насадок Борда; 3 – циліндричний насадок; 4 – насадок із прямокутним каналом; 5 – діафрагма.

пристроїв, у якості генератора кавітації для ерозійних випробувань доцільно використовувати дросельний пристрій типу циліндричного насадка і конфузorno-дифузornoного насадка. Вказані насадки мають просту проточну частину, їх просто виготовляти і вони можуть перетворити в кавітацію від 50% до 80% енергії потоку робочої рідини, що підводиться до них.

При настанні кавітації у проточній частині дросельного пристрою, струмінь рідини починає набувати розривів суцільності. При зростанні перепаду тиску на дросельному пристрої, розриви набувають більших масштабів і струмінь рідини набуває дискретного характеру – об'єми рідини чергуються із газовими кавернами. У області відновлення статичного тиску газові прошарки захоплюються і відбувається співударяння дискретних мас рідини у струмені. Співударяння дискретних мас рідини у транзитному струмені створює ударні хвилі, які ініціюють захоплення дрібних кавітаційних бульбашок (каверн). Також, у створенні кавітаційних коливань тиску приймають участь вихрові структури, що генеруються на зрізі дросельного каналу насадка і турбулентні пульсації середовища. Таким чином, кавітаційні коливання тиску, створені дросельним кавітаційним генератором, мають стохастичний характер і представляють собою “ансамбль” різних механізмів генерування коливань тиску, що реалізуються на макро- мікро рівнях [14]. Розмах кавітаційних коливань тиску співрозмірний і тиском живлення дросельного пристрою.

Максимальні значення розмаху кавітаційних коливань тиску спостерігаються при безрозмірному перепаді тиску $\overline{\Delta p} = 0,88$ і можуть перевищувати тиск живлення генератора. При збільшенні безрозмірного протитиску розмах кавітаційних коливань тиску зменшується (рис. 4).

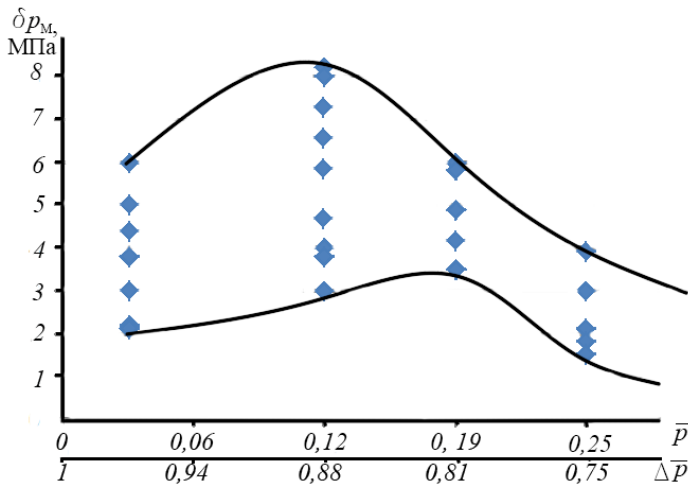


Рис.4. Залежність розмаху кавітаційних коливань тиску від безрозмірного протитиску для дросельного генератора кавітації типу циліндричного насадка; тиск живлення $p_{вх} = 8$ МПа.

Каверни малих розмірів при колапсі створюють високочастотні коливання тиску, низькочастотну складову генерує колапс великих каверн і вихрових структур. Високочастотна складова коливань тиску є ознакою виникнення кавітації. Кавітаційні коливання тиску характеризуються широкою смугою частот – від сотень герц до десятків кілогерц, що говорить про різні механізми їх генерування, і домінування того чи іншого механізму при певному перепаді

тиску на дросельному генераторі кавітації. При збільшенні безрозмірного протитиску розмах кавітаційних коливань тиску зменшується, а смуга частот додатково зміщується у високочастотну область (рис. 5). Це пояснюється тим, що при збільшенні протитиску відбувається “придушення” великих газових структур і в процесі генерування коливань тиску домінують хмари малих газових структур [15] у транзитному потоці рідини, які і спричиняють високочастотну складову коливань тиску.

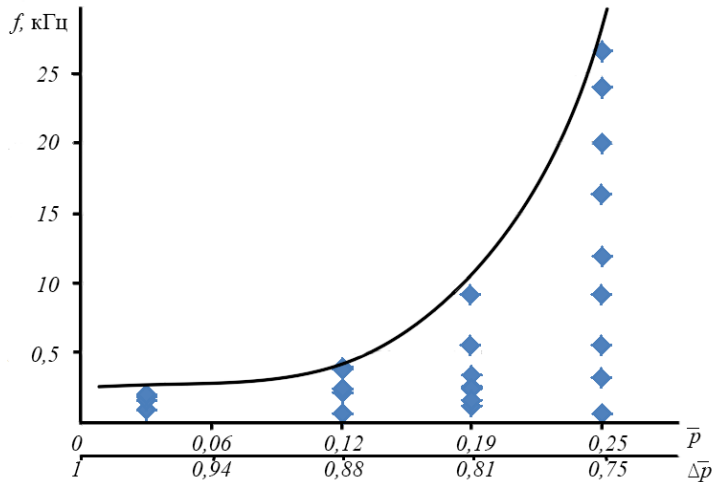


Рис. 5. Залежність частоти енергетичних максимумів від безрозмірного протитиску для дросельного генератора кавітації типу циліндричного насадку; тиск живлення $p_{\text{вх}} = 8$ МПа.

Між кавітаційними коливаннями тиску і кавітаційною ерозією існує певний зв'язок. Максимальні коливання тиску і ерозія супроводжують один одного. Суттєву роль на інтенсивність кавітаційної ерозії відіграє відстань від дросельного генератора кавітації до дослідного зразка, і кут натикання кавітаційного струменю на дослідний зразок, оскільки зони кавітаційної ерозії виникають не тільки всередині дросельних каналів, а також можуть виходити за їх межі. Максимальне значення кавітаційної ерозії дослідного зразка із сплаву АМцМ спостерігалось при відстані від зрізу циліндричного насадку до дослідного зразка що складало 12- 13 діаметрів дросельного отвору (рис. 6). Кут встановлення дросельного генератора кавітації по відношенню до дослідного зразка становив 90 градусів. Залежність приведена для генераторів типу циліндричний насадок з діаметрами дросельних отворів 1мм і 1,5мм. Зі збільшенням діаметру дросельного отвору, збільшується інтенсивність кавітаційної ерозії, оскільки збільшується гідравлічна потужність дросельного генератора кавітації і розміри хмари кавітаційних бульбашок за насадком.

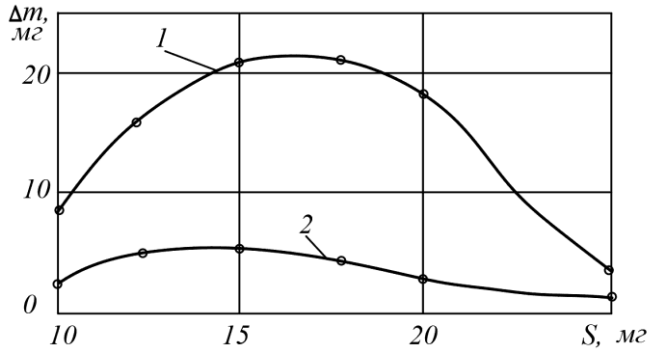


Рис. 6. Залежність втрати маси дослідного зразка від відстані; $p_{\text{вх}} = 15$ МПа; час кавітаційної експозиції $t = 600$ с; $\overline{\Delta p} = 0,98$; 1 – діаметр дросельного каналу 1 мм; 2 – діаметр дросельного каналу 1,5 мм.

На інтенсивність кавітаційної ерозії дослідного зразка, також впливає і безрозмірний протитиск на виході дросельного пристрою. Підвищення безрозмірного протитиску з одного боку обмежує розміри площі ерозії дослідного зразка (рис.7), обмежуючи довжину кавітаційного факела, що виходить назовні дросельного каналу. З іншого боку сприяє більш інтенсивному колапсу дрібних каверн, що викликає збільшення кавітаційної ерозії (рис.8). З подальшим збільшенням протитиску діаметр ерозійної плями і інтенсивність кавітаційної ерозії зменшується, оскільки відбувається опресовування об'єму кавітаційної області і “придушення” гідродинамічної кавітації.

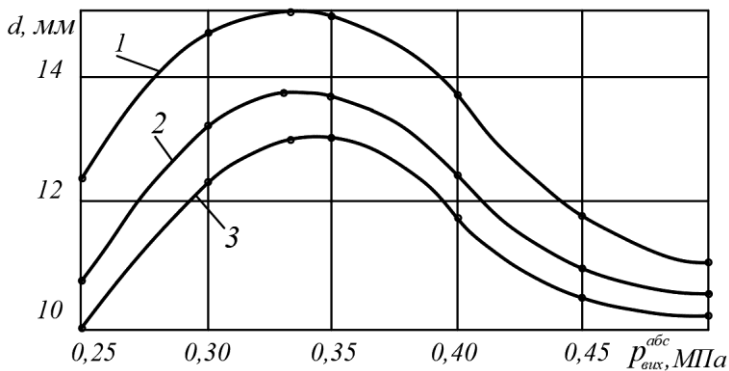


Рис. 7. Залежність діаметра зони кавітаційної ерозії дослідного зразка від протитиску; 1 – відстань від зрізу насадка циліндричного насадка 25 мм; 2 – 17 мм; 3 – 10 мм; тиск живлення $p_{\text{вх}} = 15$ МПа.

Кавітаційний струмінь у місці контакту з поверхнею дослідного зразка створює зону кавітаційної ерозії, яка складає до 20 діаметрів дросельного каналу кавітаційного генератора. При збільшенні відстані від дросельного пристрою до дослідного зразка збільшується ерозійна пляма і інтенсивність кавітаційної ерозії (рис. 7, 8). При подальшому збільшенні відстані

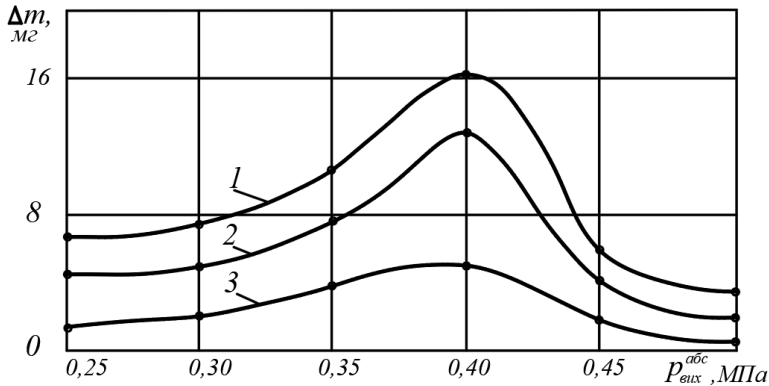


Рис. 8. Залежність втрати маси дослідних зразків із сплаву АМцМ від протитиску; 1 – відстань від зрізу насадка циліндричного насадка 25 мм; 2 – 17 мм; 3 – 10 мм; тиск живлення $p_{\text{вх}} = 15$ МПа.

інтенсивність ерозії зменшується, оскільки дослідний зразок не потрапляє у область кавітаційної хмари бульбашок. При збільшенні протитиску спостерігається скорочення довжини кавітаційного факелу і дослідний зразок буде знаходитись поза межами кавітаційної зони.

Висновки

1. Для дослідження кавітаційної ерозії конструкційних матеріалів потрібно використовувати дросельні пристрої типу циліндричний насадок і конфузorno-дифузорний насадок, оскільки вони можуть перетворити у кавітацію від 50% до 80% енергії потоку рідини. Вони мають просту конструкцію і не високу собівартість виготовлення. Як і дросельні генератори інших типів, вони використовують енергію системи стаціонарного чи мобільного гідравлічного приводу, мають високу питому потужність, максимально наближають умови випробування на кавітаційну ерозію до реальних процесів, що відбуваються у гідравлічних агрегатах літальних апаратів.

2. Гідродинамічні генератори створюють високочастотні коливання тиску високої амплітуди, яка співрозмірна із тиском живлення дросельного генератора кавітації, а також широку смугу частот кавітаційних коливань тиску; від 300 Гц до 30 кГц. Це значно прискорює проведення експерименту і наближує експеримент до реальних умов. Для дросельного генератора кавітації типу циліндричний насадок максимум кавітаційної ерозії спостерігається при протитиску 0,4 МПа при тиску живлення генератора 15 МПа.

3. Локалізація і інтенсивність кавітаційної ерозії залежить від типу дросельного генератора кавітації, режиму роботи дросельного генератора кавітації і від його гідравлічної потужності, яку зручно змінювати у широкому діапазоні, змінюючи тиск живлення і діаметр дросельного каналу. Для дросельного генератора кавітації типу циліндричний насадок, для отримання максимального ерозійного ефекту відстань до дослідного зразка має становити від 12 мм до 17 мм, при тиску живлення генератора 15 МПа.

Список літератури

1. ASTM International (2021) Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus (ASTM G32-16(2021)e1). West Conshohocken, PA: ASTM International, 20 p. <https://store.astm.org/g0032-16r21e01>
2. ASTM International Committee G02 (2021) Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus (ASTM G32-16(2021)e1). West Conshohocken, PA: ASTM International, 20 p.
3. Kuimov, D., Minkin, M., Yurov, A., Lukyanov, A. (2023) Current State of Research on the Mechanism of Cavitation Effects in the Treatment of Liquid Petroleum Products – Review and Proposals for Further Research. *Fluids*, 8(6), Art. 172. <https://doi.org/10.3390/fluids8060172>
4. Hofmann, J., Thiébaud, C., Riondet, M., Lhuissier, P., Gaudion, S., Marc, F. (2024) Influence of microstructure on mass loss caused by acoustic and hydrodynamic cavitation. *Wear*, Vol. 544–545, Art. 205402, pp. 1–12.
5. Dular, M., Barragán Montalvo, G.E., Hočevár, M., Novak, L., Ohl, C.D., Petkovšek, M. (2024) Questioning the ASTM G32-16 (stationary specimen) standard cavitation erosion test. *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 86, Art. 106930, pp. 1–12.
6. Krastev, V., et al. (2017) Influence of Ultrasound Treatment on Cavitation Erosion Resistance of AlSi7 Alloy. *Materials*, 10(3), Art. 256, pp. 1–11.
7. Cojocar, V., Campian, V.C., Frunzaverde, D. (2018) A comparative analysis of the methods used for testing the cavitation erosion resistance on the vibratory devices. *Advances in Materials Science*, 18(2)(56), pp. 259–269.
8. Pei, S., Zhang, A.-M., Liu, C., Zhang, T., Han, R., Li, S. (2025) Influence of ambient temperature on cavitation bubble dynamics. *arXiv preprint*, May 2025, pp. 1–10.
9. Nagasawa, F., Fujiwara, A., Staelens, Y., Kato, C. (2023) Comparison of acoustic and hydrodynamic cavitation: A material point of view. *Physics of Fluids*, 35(1), Art. 017112. <https://doi.org/10.1063/5.0128490>
10. Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A.-G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A.-S., Abert-Vian, M. (2017) Ultrasound assisted extraction of food and natural products: Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. *Molecules*, 22(3), Art. 714. <https://doi.org/10.3390/molecules22050714>
11. Тарасенко, Т.В., Бадах, В.М. (2023) Дослідження кавітаційної ерозії конструкційних матеріалів. *Проблеми тертя та зношування*, 4(101), с. 73–83. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(101\).18081](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(101).18081)
12. Zhang, W., Xie, C., Fan, H., Liu, B. (2022) Influence of Hole Geometry on Performance of a Rotational Hydrodynamic Cavitation Reactor. *Frontiers in Energy Research*, 10, Art. 881811. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.881811>
13. Blagojevic, M., Rak, G., Bizjan, B., Repinc, S.K. (2023) A Review on Rotary Generators of Hydrodynamic Cavitation for Wastewater Treatment and Enhancement of Anaerobic Digestion Process. *Processes*, 11(2), Art. 514. <https://doi.org/10.3390/pr11020514>
14. Tarasenko, T., Badakh, V., Makarenko, M., Lukianov, P., Dubkovetskiy, I. (2024) Determining the mechanism for generating cavitation pressure fluctuations in throttle devices at high-head throttling of liquid. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(7(130)), pp. 21–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309656>
15. Zhang, J., Fu, J., Zhang, X., Zhang, T., Wang, Y. (2023) Cavitation Observation and Noise Characteristics in Rectangular Throttling Groove Spool. *Processes*, 11(10), Art. 2814. <https://doi.org/10.3390/pr11102814>

Отримано: 29 січня 2026

Прийнято: 20 лютого 2026

Опубліковано: 9 квітня 2026

T. TARASENKO

CHARACTERISTICS OF THROTTLE CAVITATION GENERATORS FOR EROSION TESTING OF STRUCTURAL MATERIALS

Practical interest for researchers and engineers in hydraulic machinery engineering lies in the development of effective methods for accelerated erosion testing of structural materials under conditions that are as close as possible to real hydrodynamic cavitation regimes. This paper investigates the characteristics of throttle-type hydrodynamic generators of cavitation-induced pressure fluctuations and evaluates their suitability for erosion testing of structural materials.

The aim of the study is to determine effective operating regimes of throttle cavitation generators and to assess the influence of generator operating conditions on the intensity and localization of cavitation erosion.

Experimental investigations were carried out on a hydraulic test bench at pressures of up to 25 MPa using throttle devices of various types (cylindrical nozzle, converging–diverging nozzle, Borda nozzle, rectangular channel, and orifice plate). Aluminum alloys D16ATV and AMtsM, which are characterized by increased sensitivity to cavitation damage, were used as model materials. Measurements of rapidly varying cavitation-induced pressure fluctuations were performed over a wide frequency range, accompanied by simultaneous evaluation of specimen mass loss.

It was established that throttle cavitation generators produce stochastic cavitation pressure fluctuations with a wide frequency band ranging from several hundred hertz to several tens of kilohertz, with amplitudes comparable to the supply pressure. It is shown that with an increase in dimensionless back pressure, the amplitude of cavitation pressure fluctuations decreases, while the spectral energy maxima shift toward the high-frequency range, which is associated with the dominance of small-cavity collapse. Optimal distances from the throttle generator to the specimen surface and operating regimes providing maximum cavitation erosion intensity were determined. It is demonstrated that cylindrical and converging–diverging nozzles ensure the most efficient conversion of flow energy into the energy of cavitation pressure fluctuations.

The obtained results confirm the feasibility of using throttle-type hydrodynamic cavitation generators for erosion testing of structural materials and make it possible to bring laboratory cavitation erosion studies closer to the real operating conditions of hydraulic system components.

Key words: hydraulic drive, throttle device, cavitation erosion, hydraulic drive system, cavitation-induced pressure fluctuations.

References

1. ASTM International (2021). *Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus* (ASTM G32-16(2021)e1). West Conshohocken, PA: ASTM International, 20 p. <https://store.astm.org/g0032-16r21e01>
2. ASTM International Committee G02 (2021). *Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus* (ASTM G32-16(2021)e1). West Conshohocken, PA: ASTM International, 20 p.
3. Kuimov, D., Minkin, M., Yurov, A., Lukyanov, A. (2023). *Current State of Research on the Mechanism of Cavitation Effects in the Treatment of Liquid Petroleum Products: Review and Proposals for Further Research*. *Fluids*, 8(6), Article 172. <https://doi.org/10.3390/fluids8060172>
4. Hofmann, J., Thiébaud, C., Riondet, M., Lhuissier, P., Gaudion, S., Marc, F. (2024). *Influence of Microstructure on Mass Loss Caused by Acoustic and Hydrodynamic Cavitation*. *Wear*, Vol. 544–545, Article 205402, pp. 1–12.
5. Dular, M., Barragán Montalvo, G. E., Hočevár, M., Novak, L., Ohl, C. D., Petkovšek, M. (2024). *Questioning the ASTM G32-16 (Stationary Specimen) Standard Cavitation Erosion Test*. *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 86, Article 106930, pp. 1–12.
6. Krastev, V., et al. (2017). *Influence of Ultrasound Treatment on Cavitation Erosion Resistance of AlSi7 Alloy*. *Materials*, 10(3), Article 256, pp. 1–11.

7. Cojocaru, V., Campian, V. C., Frunzaverde, D. (2018). *A Comparative Analysis of the Methods Used for Testing Cavitation Erosion Resistance on Vibratory Devices*. *Advances in Materials Science*, 18(2)(56), pp. 259–269.
8. Pei, S., Zhang, A.-M., Liu, C., Zhang, T., Han, R., Li, S. (2025). *Influence of Ambient Temperature on Cavitation Bubble Dynamics*. arXiv Preprint, May 2025, pp. 1–10.
9. Nagasawa, F., Fujiwara, A., Staelens, Y., Kato, C. (2023). *Comparison of Acoustic and Hydrodynamic Cavitation: A Material Point of View*. *Physics of Fluids*, 35(1), Article 017112. <https://doi.org/10.1063/5.0128490>
10. Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A.-G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A.-S., Abert-Vian, M. (2017). *Ultrasound-Assisted Extraction of Food and Natural Products: Mechanisms, Techniques, Combinations, Protocols and Applications*. *Molecules*, 22(3), Article 714. <https://doi.org/10.3390/molecules22050714>
11. Tarasenko, T. V., Badakh, V. M. (2023). *Investigation of Cavitation Erosion of Structural Materials*. *Problems of Friction and Wear*, 4(101), pp. 73–83. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(101\).18081](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(101).18081)
12. Zhang, W., Xie, C., Fan, H., Liu, B. (2022). *Influence of Hole Geometry on the Performance of a Rotational Hydrodynamic Cavitation Reactor*. *Frontiers in Energy Research*, 10, Article 881811. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.881811>
13. Blagojevic, M., Rak, G., Bizjan, B., Repinc, S. K. (2023). *A Review on Rotary Generators of Hydrodynamic Cavitation for Wastewater Treatment and Enhancement of Anaerobic Digestion Processes*. *Processes*, 11(2), Article 514. <https://doi.org/10.3390/pr11020514>
14. Tarasenko, T., Badakh, V., Makarenko, M., Lukianov, P., Dubkovetskiy, I. (2024). *Determining the Mechanism for Generating Cavitation Pressure Fluctuations in Throttle Devices at High-Head Throttling of Liquid*. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(7(130)), pp. 21–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309656>
15. Zhang, J., Fu, J., Zhang, X., Zhang, T., Wang, Y. (2023). *Cavitation Observation and Noise Characteristics in a Rectangular Throttling Groove Spool*. *Processes*, 11(10), Article 2814. <https://doi.org/10.3390/pr11102814>

Taras Tarasenko — PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Hydrogas Systems, Kyiv Aviation Institute, 1 Liubomyra Huzara Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, tel.: +380 96 922 54 04, e-mail: nauggs18@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-8287-4873>

Тарасенко Тарас Валерійович - канд. техн. наук, доцент кафедри гідрогазових систем, Київський авіаційний інститут, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +380969225404, E-mail: nauggs18@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-8287-4873>.