ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ЗАНУРЕНОГО СТРУМЕНЯ НА РІВЕНЬ ЗВУКУ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА

А.В.ЖУКОВА

Одеський національний політехнічний університет

Одержано 02.12.2009

Струминний гідродинамічний випромінювач протиточного типу моделюється зануреною струминною "оболонкою" у вигляді зрізаного конуса. Динаміка "оболонки" визначає характеристики генерованого акустичного поля, зокрема, його інтенсивність. Чим вища амплітуда деформації згину вільного краю струминної "оболонки", тим більша кількість парогазових каверн з внутрішньої області "оболонки" виходить назовні й вищий рівень звуку, згенерованого при їхньому колапсі. Максимуму відповідає оптимальна швидкість струменя, при якій частота пульсацій нестійкого тороїдального вихора збігається з власною частотою "оболонки". Статтю присвячено експериментальному дослідженню залежності інтенсивності акустичного поля гідродинамічного випромінювача від геометричних, гідродинамічних параметрів струменя й властивостей рідини.

Струйный гидродинамический излучатель противоточного типа моделируется затопленной струйной "оболочкой" в виде усеченного конуса. Динамика "оболочки" определяет характеристики генерируемого акустического поля, в частности, его интенсивность. Чем выше амплитуда деформации изгиба свободного края струйной "оболочки", тем большее количество парогазовых каверн из внутренней области оболочки выходит наружу и выше уровень звука, генерируемого при их коллапсе. Максимуму отвечает оптимальная скорость струи, при которой частота пульсаций неустойчивого тороидального вихря совпадает с собственной частотой "оболочки". Статья посвящена экспериментальному исследованию зависимости интенсивности акустического поля, генерируемого гидродинамических излучателем от геометрических, гидродинамических параметров струи и свойств жидкости.

The counter-flow hydrodynamic jet radiator is modeled by a truncated conic submerged jet "shell". The dynamics of the "shell" determines the characteristics of generated acoustic field, in particular, its intensity. The higher is bending amplitude of the free end of jet "shell", the more vapor-gas cavities from the internal "shell's" area come outside and the higher is level of the sound generated by their collapse. Its maximum corresponds to the optimal jet's velocity, at that the frequency of pulsations of the unstable toroidal vortex coincides with "shell's" eigenfrequency. The paper deals with the experimental studying of the dependence of intensity of the acoustic field generated by the hydrodynamic radiator from jet's geometric, hydrodynamic parameters and properties of a liquid.

вступ

Занурені струмені й вихори можна ефективно використовувати для генерування тональних акустичних сигналів високої інтенсивності у гідродинамічних випромінювачах (ГДВ), у яких частина кінетичної енергії струменя перетворюється в енергію акустичних хвиль [1].

Розглянемо фізичну модель струминного ГДВ протиточного типу (рис. 1, а). Занурений струмінь, що витікає із сопла 1, формується відбивачем з параболічною лункою 2 в осесиметричну струминну "оболонку" 3 у формі зрізаного конуса. При натіканні конічного струменя на зовнішню кромку сопла частина його кінетичної енергії витрачається на формування вихора 4, всередині якого за рахунок ефекту Бернулі виникає кавітація й утворюється дисперсна суспензія парогазових пухирців (каверн) у рідині (затінена область на рис. 1, δ). Частина струменя витікає у навколипній простір і в автоколиваннях участі не бере, тому висотою "оболонки" вважають відстань від торця відбивача до торця сопла. При виникненні двофазного середовища механічний імпеданс внутріпіньої області значно зменшується, що сприяє виникненню в системі режиму автоколивань. Згідно з існуючими уявленнями, пульсації вихора збуджують коливання струминної "оболонки" на власній частоті. Разом з потоком рідини частина кавітаційних пухирців виходить назовні. Завдяки ефекту Кармана формується вторинний тороїдальний вихор розвинутої кавітації 5 – зона найбільшої кавітаційної ерозії. Оптимальний режим гідродинамічного звукоутворення, при якому спостерігається максимальний акустичний сигнал, відповідає збігу частоти пульсацій тороїдального вихору з частотою основної гармоніки коливань струминної "оболонки" [2-4].

Чим вищою буде амплітуда деформації згину вільного краю струменя, тим більша кількість парогазових каверн з первинного тороїдального вихора вийде назовні. Вважається, що при їхньому колапсі у вторинному тороїдальному вихорі буде підвищуватись інтенсивність генерованого оболонкою звуку. Таким чином, зросте частка кінетичної потужності зануреного кільцевого струменя, яка



Рис. 1. Схема протиточного ГДВ (a); фотографія на просвіт зануреної струминної "оболонки" (б)



Рис. 2. Залежності оптимальної швидкості (a) і рівня сигналу (б) від радіуса меншої основи конічного струменя: 1 – у водопровідній воді; 2 – у трансформаторній оливі

перетвориться в акустичний сигнал, тобто підвищиться акусто-гідродинамічний к.к.д. струминного ГДВ. Оскільки між цими процесами існує пряма залежність, то амплітуду вимушених коливань струменя можна оцінювати за рівнем генерованого звуку.

Попередні дослідження показали залежність частотних характеристик сигналу від геометричних [5,6] і гідродинамічних [7] параметрів струменя, а також надлишкового статичного тиску в



Рис. 3. Залежності рівня сигналу від довжини (a) й конусності (б) струминної "оболонки" для трансформаторної оливи: $1 - r_1 = 2.0$ мм; $2 - r_1 = 3.5$ мм; $3 - r_1 = 4.5$ мм

рідині. Метою цієї статті буде оцінка впливу вказаних параметрів на рівень генерованого сигналу.

1. ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СТРУМЕНЯ НА РІВЕНЬ АКУСТИЧНОГО СИГНАЛУ

Під час проведення досліджень ГДВ розміщувався у герметичній ємності, в якій можливо плавно регулювати надлишковий статичний тиск. Насос із регулюваною витратою рідини забезпечував плавне регулювання швидкості струменя на виході сопла. У всіх експериментах ГДВ настроювався на максимальне звучання підбором оптимальної швидкості струменя. За робочі рідини правили відстояна водопровідна вода й трансформаторна олива. Сигнал з каліброваного гідрофона надходив на осцилограф, електронний вольтметр й аналізатор спектра.

На рис. 2, а і б відображено залежності оптимальної швидкості $v_{\text{опт}}(r_1)$ і рівня генерованого акустичного сигналу $p(r_1)$ від радіуса меншої основи зрізаної конічної "оболонки". Для їх побудови було використано шість пар "сопло–відбивач" з відповідними радіусами зовнішньої кромки сопла r_2 . Довжина струменя ℓ змінювалася за рахунок регулювання відстані між соплом і відбивачем (див. рис. 1, а). Наголосимо, що в даному експерименті при різних значеннях r_1 підтримувалась постійною конусність струменя $\theta = \operatorname{arctg}[(r_2 - r_1)/\ell]$. Криві 1 відповідають випромінюванню звуку у воді, а 2 – у мінеральній оливі.

Оптимальна швидкість струменя на виході з сопла відповідає максимальному рівню акустичного сигналу, генерованого ГДВ. Зауважимо, що для випромінювання звуку максимального рівня у трансформаторній оливі необхідна більша гідродинамічна потужність зануреного струменя. Це пов'язано з тим, що олива має більшу в'язкість, ніж вода. Як наслідок, за інших рівних умов, рівень звуку в більш в'язкій рідині завжди нижчий.

Також було досліджено залежності рівня генерованого звуку від довжини ℓ конічної струминної "оболонки". Використались випромінювачі з трьома відбивачами, що задають радіус меншої основи конуса $r_1 = 2.0$, 3.5 і 4.5 мм. Кожний відбивач застосовувався в парі з відповідним соплом, яке забезпечує оптимальне співвідношення радіусів основ зрізаного конуса r_2/r_1 . Параметр ℓ можна було регулювати, плавно змінюючи відстань між соплом і відбивачем. За робочу рідину вибиралось мінеральна олива. Відповідні залежності $p(\ell/r_1)$ представлені на рис. 3, а. З графіків видно, що оптимальне значення довжини "оболонки" перебуває в межах $\ell/r_1 = (0.9...1.1)$. При цьому в однаковому діапазоні зміни відносної довжини конічної струминної "оболонки" рівень акустичного сигналу значно знижується при малих r₁. Це пов'язано з супутнім зменшенням кінетичної потужності струменя.







Рис. 5. Залежність оптимальної швидкості струменя від статичного тиску для трансформаторної оливи: $1 - r_1 = 2.5$ мм; $2 - r_1 = 3.0$ мм; $3 - r_1 = 3.5$ мм; $4 - r_1 = 4.0$ мм; $5 - r_1 = 4.5$ мм

Залежності рівня генерованого акустичного сигналу від конусності "оболонки" $p(\theta)$ при тих самих значеннях r_1 показані на рис. 3, б. Конусність струменя змінювалася шляхом заміни сопла з тим же діаметром прохідного отвору, але з іншим радіусом зовнішньої кромки r_2 . Показано, що оптимальна конусність струминної "оболонки" відповідає діапазону значень $\theta = (34...36)^\circ$.

2. ВПЛИВ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕ-ТРІВ СТРУМЕНЯ НА РІВЕНЬ ЗВУКУ

На рис. 4, а дані залежності відносного рівня сигналу протиточних ГДВ $(p/p_{\rm max})$ від швидкості струменя, нормовані стосовно відповідного оптимального значення $(v/v_{\rm onr})$. При цьому було виявлено дві закономірності. По-перше, зі збільшенням габаритів струминної "оболонки" звужується відносний діапазон робочих швидкостей даного типу випромінювачів – від $(0.85...1.15) v_{\rm onr}$ при $r_1=2.5$ мм до $(0.95...1.05) v_{\rm onr}$ при $r_1=4.5$ мм. По-друге, більшим розмірам відповідає вища оптимальна швидкість струменя на виході з сопла (див. рис. 2, а). Зазначимо, що відповідний діапазон регулювання швидкості досить обмежений.

Спробуємо пояснити цю особливість струминних ГДВ. Якщо всередині кільцевого струменя перебуває двофазне середовище "рідина – парогазові пухирці" (див. рис. $1, \delta$), то значення акустичного імпедансу цього об'єму мале у порівнянні з су-



Рис. 6. Залежність рівня акустичного сигналу від статичного тиску для трансформаторної оливи при швидкості струменя: 1 – v₁=36 м/с; 2 – v₂=75 м/с; 3 – v₃=90 м/с; 4 – v₄=108 м/с; 5 – v₅=120 м/с; 6 – v₆=136 м/с; 7 – v₇=160 м/с; 8 – v₈=170 м/с

цільною рідиною в зовнішній області. За таких умов занурений струмінь, який здійснює поперечні коливання, здатний випромінювати звук високої інтенсивності. При занадто малих швидкостях струменя розвинена кавітація зникає. У результаті акустичний імпеданс однофазного середовища у внутрішній області струминної "оболонки" настільки зростає, що випромінювання акустичних хвиль припиняється. При занадто великих швидкостях витікання рідини кавітація виникає вже в каналі сопла, що призводить до руйнування струминної "оболонки" й зриву режиму генерування тонального акустичного сигналу.

Відомі авторові дослідження залежності інтенсивності акустичних хвиль від статичного тиску проводилися для перетворювачів магнітострикційного й п'єзоелектричного типів. Що стосується ГДВ, то у працях [2, 3, 6] наведені дані лише для досить обмеженого діапазону статичних тисків $\Delta P_{\rm cr} = (0 \dots 3 \cdot 10^5)$ Па. Окрім того, вимірювання рівня сигналу проводилися при фіксованих значеннях швидкості струменя. Тому ставилась задача розширити розглянуті діапазони статичного тиску й швидкості струменя на виході сопла. Окрім того, вважалось за доцільне досліджувати залежність максимального рівня акустичного сигналу від статичного тиску. На рис. 4, б відображено залежності рівня сигналу, генерованого протиточним ГДВ, від надлишкового (у порівнянні з атмосферним) статичного тиску в незбуреній рідині. Гідрофон розташовувався на відстані 100 мм від межі зони звукоутворення. Дані, представлені для трьох випромінювачів з різними геометричними параметрами конічної струминної "оболонки", демонструють подібні тенденції. Видно, що при надлишковому статичному тиску в діапазоні $\Delta P_{\rm cr} = (0 \dots 2.5)$ МПа звуковий тиск підвищується майже на порядок.

У всіх експериментах випромінювачі настроювались на максимальний рівень звуку встановленням оптимальної довжини струминної "оболонки" (див. рис. 3, а) і оптимальної швидкості $v_{\text{опт}}$ струменя на виході сопла. Швидкість $v_{\text{опт}}$ регулювалась шляхом зміни витрати рідини на виході насоса. Вимірявши останню величину й знаючи площину перетину сопла, обчислювалась швидкість струменя. Експериментальні залежності оптимальної швидкості від надлишкового статичного тиску $v_{\text{опт}}(\Delta P_{\text{ст}})$ відображені на рис. 5.

Була проведена серія експериментів, де за параметр вибиралася швидкість струменя, яка контролювалась за рахунок зміни витрати основного насоса. Надлишковий статичний тиск $\Delta P_{\rm ct}$ в герметичній ємності плавно змінювався за допомогою додаткового насоса й клапана регулювання тиску. Гідрофон розташовувався на відстані 180 мм від осі випромінювача. Досліджувались залежності оптимальної швидкості рідини на виході з сопла від статичного тиску за умов генерування максимального рівня звуку. Відповідні результати представлені на рис. 6.

Отримані залежності рівня звуку від статичного тиску в рідині мають виражений максимум. Вони подібні до результатів, наведених у працях [8,9], хоча в експериментах з магнітострикційними або п'єзокерамічними перетворювачами створювались більш високі статичні тиски, а за параметр правили струм або напруга електричного генератора, що живив систему.

ВИСНОВКИ

- Досліджено вплив геометричних параметрів зануреного струменя на рівень сигналу, генерованого струминними ГДВ. Визначено їхнє оптимальне співвідношення.
- Досліджено залежності рівня акустичного сигналу від гідродинамічних параметрів і властивостей рідини. При цьому максимальній інтенсивності звуку відповідає оптимальне значення швидкості струменя, що залежить від статичного тиску, габаритів струминної "оболонки" та властивостей рідини.
- Шляхом збільшення надлишкового статичного тиску в робочій рідині й одночасного підбору оптимальної швидкості струменя досягнуто підвищення рівня звуку майже на порядок.

- Назаренко А. Ф. Гидродинамические излучатели // Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под ред. И. П. Голяминой. М.: Сов. энцикл, 1979. С. 79–81.
- Дудзинский Ю. М., Сухарьков А. О., Маничева Н. В. Энергетика прямоточного гидродинамического излучателя в условиях гидростатического давления // Акуст. вісн. – 2004. – 7, N 1. – С. 44–49.
- Дудзинский Ю. М. Динамика затопленной осесимметричной кольцевой струи // Доп. НАН України.– 2006.– N 1.– С. 46–51.
- Dudzinski Yu. M., Suharkov O. V., Manicheva N. V. Axial-symmetric hydrodynamic radiators use for fluid cavitation threshold measurement // IV-th Int. Hutsulian Workshop on Mathematical Theories and Their Applications in Physics & Technology (28 Oct. - 02 Nov. 2002, Chernivtsi, Ukraine).- Kyiv: TI-MPANI, 2004.- P. 275-286.
- Дудзінський Ю. М., Сухарьков О. В. Спектр звуку, генерованого зануреною осесиметричною струминною оболонкою // Мат. мет. фіз.-мех. поля.-2007.– 50, N 2.– С. 129–134.
- Дудзінський Ю. М., Сухарьков О. В., Манічева Н. В. Модель прямоточного гідродинамічного випромінювача з кільцевим соплом і східчастою перешкодою // Акуст. вісн.– 2004.– 7, N 3.– С. 48– 51.
- Дудзинский Ю. М., Дащенко А. Ф. Собственные колебания струйной оболочки в условиях гидростатического давления // Прикл. мех.– 2004.– 40, N 12.– С. 92–98.
- Сиротюк М. Г. Протекание процессов ультразвуковой кавитации при повышенных гидростатических давлениях // Акуст. ж.– 1966.– 12, N 2.– С. 231– 238.
- Агранат Б. А., Башкиров В. И., Китайгородский Ю. И. Физические основы ультразвуковой технологии: Ультразвуковая очистка.– М.: Наука, 1970.– 280 с.