

інтервалу основних статистичних параметрів (середнього і дисперсії) та аналізу зміни даних параметрів за допомогою статистичних критеріїв (гіпотез). Аналіз гістограм показав, що застосування крилового ВГ в соплі камери призводить до зміни гістограм, а отже, законів щільності розподілу ймовірностей в досліджуваних точках порівняно з випадком без керування, що свідчить про певний вплив керувальних дій на потужну спіралеподібну КВС — головну складову течії середовища в тупиковій зоні ВК. Встановлено, що при роботі вихрових джгутів крилового ВГ в соплі в одній з найбільш характерних точок тупикової зони відбувається явне зменшення середньої швидкості течії. Натомість, з амплітудно-частотних характеристик впливає таке ж явне зростання амплітуд пульсаційного руху з появою низки нових енергонесучих частот при наявності керувальної дії. Це може свідчити про перерозподіл енергії середнього руху на користь енергії пульсацій в результаті взаємної сприйнятливості керувальних вихорів крила і керованих КВС в тупиковій зоні камери. Для з'ясування ефекту керування структурою течії в порожнині ВК на її вихідні характеристики проведено аналіз енергетичного балансу пульсаційних швидкостей в залежності від смуги пропускання фільтра нижніх частот в пристінній зоні вихідного перерізу ВК у смузі частот 0–100 Гц. Енергія пульсаційних швидкостей визначається рівнянням $E' = 0,5D$, де D – дисперсія актуальної швидкості. Смуги пропускання цифрового фільтра нижніх частот збільшувалися з 0–5 Гц, 0–10 Гц і далі до 0–100 Гц. Побудовано графіки зміни енергії пульсації колової швидкостей потоку у вихідному перерізі ВК без крила-ВГ та з його використанням в залежності від смуг пропускання фільтра. Їх аналіз дозволяє зробити висновок, що наявність крила-ВГ підвищує енергію пульсаційної швидкості в смузі частот 0–35 Гц приблизно в 1,5–2 рази, а смузі частот 35–85 Гц зменшує її на 20–30%. Таким чином, спостерігається «перекачування» енергії пульсацій від відносно дрібних вихорів до вихорів більш крупних масштабів, які найбільшим чином впливають на процеси переносу маси, імпульсу та енергії в потоках. Виявлено також, що в частотному діапазоні 0–250 Гц наявність вихорогенератора більш ніж на 70% підвищує енергію пульсацій швидкості потоку в пристінній зоні вихідного перерізу вихрової камери.

Список літератури

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя : [монография] / Г. Шлихтинг ; пер. с нем. Г. А. Вольперта под ред. Л. Г. Лойцянского. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1974. – 712 с.
2. Турик В.Н. О гидродинамической неустойчивости течений в вихревых камерах / В.Н. Турик // Промислова гідраліка і пневматика. – 2006. – № 3(13). – С. 32–37.
3. Lilley A.K. Swirl Flows / A.K. Lilley, D.G. Gupta, N. Syred. – Kent., USA: Abacus Press, 1984. – 475 p.
4. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил: [монография] В 4 т. / А. А. Халатов, А. А. Авраменко, И. В. Шевчук. — К. : Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2000. — Т. 3: Закрученные потоки. — 474 с.
5. Бабенко В. В. Макет вихревых структур при течении потока в вихревой камере / В. В. Бабенко, В. Н. Турик // Прикладна гідромеханіка. — 2008. — Т. 10 (82), № 3. — С. 3–9.
6. Babenko V. Coherent Vortical Structures Control in Flat and Curvilinear Parietal Flows / V. Babenko, V. Turick // Proc. of the World Congress “Aviation in the 21-st Century” (14-16 Sept., 2003). – Kyiv : NAU, 2003. – P. 2.54–2.58.

УДК 621.031:664.292

Берник І.М., докторант

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМІВ І ПАРАМЕТРІВ АКУСТИЧНОЇ ОБРОБКИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ

Анотація. Відомі розрахункові моделі для визначення параметрів ультразвукової кавітаційної обробки дисперсних технологічних середовищ та режимів не враховують зміну їх у часі. При цьому параметри, що пропонуються, визначаються на основі роздільного дослідження динаміки акустичного

апарату та руху середовища. Такий підхід є допустимим виключно на припущенні справедливості принципу суперпозиції.

На основі поєднання реологічних властивостей із енергетичними та акустичними параметрами технологічних середовищ запропоновано їх класифікацію. Практичні розрахунки режимів кавітаційної обробки дисперсних середовищ базуються на континуальній моделі, що містить дисипативну складову з врахуванням закону її зміни. Коефіцієнт розсіювання енергії, враховує процеси поглинання та розсіювання енергії в середовищі. Запропоновано критерії оцінки ефективності енергетичних дій на технологічні середовища. Напружений стан об'єму кавітуючих бульбашок визначається швидкістю зміни напруження в середовищі. Розроблено алгоритми визначення раціональних параметрів та режимів процесів акустичної обробки дисперсних технологічних середовищ.

Розглянуто особливість застосування різних режимів ультразвукових коливань для обробки технологічних середовищ. З'ясовано, що традиційні підходи дослідників базуються на уявленні проходження кавітаційного процесу, як певні послідовно здійснені етапи зародження, розвитку та захоплення бульбашки [1]. Розрахункова модель технологічного середовища в процесі обробки трактується, як правило, незмінною у часі, а середовище розглядається як деяка приєднана маса до кавітаційного апарата. Разом з тим, очевидним фактом процесу є зміна параметрів технологічного середовища. Другою особливістю виконаних раніше робіт є роздільне дослідження динаміки акустичного апарату та рух середовища, як окремої системи [2]. Таке припущення не дає повної картини процесу кавітаційної обробки з точки зору встановлення взаємовпливу апарата і середовища. Практично всі роботи, що були розглянуті в процесі оцінки їхніх переваг та недоліків, застосовують лінійні коливання бульбашки із сферичною поверхнею без урахування в'язкості [3]. Не зважаючи на обставину, що в останній час з'явилося ряд робіт із намаганням врахування в'язкості, залишається невирішеною задача впливу цієї в'язкості на вибір режимів і параметрів технологічного процесу з мінімізацією енергетичних витрат та швидкістю його протікання. Проведений огляд та аналіз моделей засвідчив, що до цього часу відсутня загальноприйнята математична модель бульбашки, а існуючі числові значення реологічних властивостей середовищ в розглянутих роботах коливаються в широких межах [4].

Дисперсні системи, під дією прикладених до них зовнішніх зусиль в процесі реалізації етапів кавітаційної обробки, проявляють пружні та зсувні деформації. Їх реальне врахування обумовлене вибраною розрахунковою моделлю. Відома низка моделей, які в тій чи іншій спосіб враховують реологічні властивості середовищ під дією певних сил навантаження. Так, наприклад, модель Кельвіна-Фойгта відображає явище пружної післядії, котре представляє собою зміну пружної деформації в часі, коли вона чи постійно зростає до деякої межі після прикладення навантаження, чи поступово зменшується. Дана модель широко застосовується в середовищах з залежністю сил опору (дисипативні властивості) від частоти. За моделлю Максвелла середовище поводить себе як пружне чи пластичне залежно від відношення часу релаксації до часу силової дії на це середовище. Якщо під дією миттєвого зусилля пружина, що моделює пружні властивості середовища, розтягується, а потім миттєво напруження зникає, то поршень, який відображає дисипативні властивості, не встигає рухатися і система поводить себе як пружне середовище. З іншого боку, якщо підтримувати розтягування пружини постійно, то вона поступово релаксує, переміщуючи поршень вгору і система поводить себе майже як ньютонівська рідина. В цілому ці дві, найбільш відомі моделі, справедливі для лінійної поведінки середовищ. Певною системою з'єднань пружних та в'язкопластичних елементів отримують модель в'язко-пружного середовища Шведова – Бінгама. Застосування цих моделей для обробки середовищ акустичним методом потребує уточнення в частині складу дисперсного середовища, відповідності зміни дисипативних властивостей та пружних властивостей за лінійним чи нелінійним законами. Існує і інший підхід моделювання реологічних властивостей середовища. Він ґрунтується на використанні емпіричних залежностей, в яких деформації і швидкості деформацій пов'язані ступеневими або більш складними законами[5].

В роботі розроблена загальна класифікація технологічних середовищ на основі поєднання всіх складових їхніх реологічних властивостей із енергетичними та акустичними параметрами. Виконаними дослідженнями доведено, що в практичних розрахунках технологічне середовище має базуватися на континуальній моделі із обов'язковим врахуванням дисипативної складової за певним законом її зміни. Для оцінки ефективності застосування того чи іншого режиму ультразвукової кавітації розглянуто існуючі підходи передачі енергії від акустичного апарату до технологічного середовища. Реалізація лінійного режиму потребує забезпечення умови, за якою бічні розміри поверхні акустичного апарату у напрямку передачі енергії по координаті x набагато перевищують довжину (λ) звукової хвилі. За другої умови має забезпечуватися збереження суцільності руху в зоні контакту апарату і середовища. Дисипативні властивості враховуються, коефіцієнтом розсіювання енергії, який описує передачу енергії від звукової хвилі до середовища переважно через процеси поглинання та розсіювання. Поглинання перетворює акустичну енергію в тепло, переважно через в'язке тертя. Відомо принципово інший підхід до інтенсифікації тепломасообмінних і гідромеханічних процесів в дисперсних середовищах, який названий принципом дискретно-імпульсного введення енергії [6]. Сутність його полягає у швидкій зміні зовнішнього тиску. Разом з тим, очевидно для забезпечення ефективного протікання кавітаційного процесу необхідно враховувати швидкість наростання імпульсу, тобто час імпульсу має бути узгодженим з часом захоплення бульбашок.

В роботі запропоновано критерій оцінки ефективності енергетичних дій на технологічні середовища, головними складовими якого є швидкість зміни напруження в середовищі за певний період часу[7]. Саме ці параметри визначають створений кавітаційним апаратом в середовищі змінний у часі напружений стан максимального об'єму кавітуючих бульбашок. Цей максимальний стан середовища має бути досягнутим на етапі розвиненої кавітації, як визначальний всього технологічного процесу. Отриманими результатами обґрунтовано методи та алгоритми визначення раціональних параметрів та режимів процесів акустичної обробки дисперсних технологічних середовищ.

Література

1. Шестаков, С. Д. (2010) Многопузырьковая акустическая кавитация: математическая модель и физическое подобие // Электронный журнал "Техническая акустика", №14, 16 с.
2. Du, T. A., Huang, Ch. and Wang, Y. (2016) "Numerical Model for Evolution of Internal Structure of Cloud Cavitation", ISROMAC-2016 (International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery), April, Hawaii, Honolulu, pp. 10–15.
3. Иткулова, Ю. А., Абрамова, О. А., Гумеров, Н. А., Ахатов, И.Ш. (2014) Моделирование динамики пузырьков в трехмерных потенциальных течениях на гетерогенных вычислительных системах быстрым методом мультиполей и методом граничных элементов / Вычислительные методы и программирование, Т. 15, С. 239-257.
4. Розина, Е. Ю. (2005) Звукокапиллярный метод определения скорости звука в кавитирующей жидкости // Акустичний вісник, Том 8, №4, С. 51–58.
5. Берник, І.М. (2018) Дослідження в'язкості дисперсних середовищ в умовах їхньої інтенсивної обробки // Техніка, енергетика, транспорт АПК, 1(100), С. 62–67.
6. Долинский, А.А., Ивануцкий, Г.К. (2008) Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. Теплофизические основы дискретно-импульсного ввода энергии, Киев: Наукова думка, 381 с.
7. Bernyk, I. (2017) Theoretical aspects of the aspects of the formation and the development of cavitation processes in a technological environment// MOTROL. Commission of Motorization and Energetic in Agriculture, Vol. 19, № 3, P. 3–12.