

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ

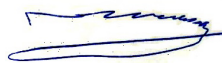
(повна назва інституту/факультету)

КАФЕДРА АКУСТИЧНИХ ТА МУЛЬТИМЕДІЙНИХ СИСТЕМ

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри



С. А. Найда

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ 07 ” 06 2021 р.

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності (спеціалізації) 171 – Електроніка

(код та назва спеціальності)

на тему: «Розробка принципів побудови пристроїв для мийки та очищення склотари на основі застосування звукових полів високої інтенсивності»

Виконав: студент 4 курсу, групи ДГ-71

(шифр групи)

Маташин Андрій Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові)



(підпис)

Керівник професор кафедри АМЕС, д.т.н., проф. Лейко О. Г

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)



(підпис)

Консультант _____

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент м.н.с ЦНДІ ОВТ ЗС України, к.т.н., Позднякова О. М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)



(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____



(підпис)

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет Електроніки

(повна назва)

Кафедра Акустичних та мультимедійних систем

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) 171 – Електроніка

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри



С. А. Найда

(підпис)

(ініціали, прізвище)

« 07 » 06 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Маташину Андрію Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розробка принципів побудови пристроїв для мийки та очищення склотари на основі застосування звукових полів високої інтенсивності»

керівник роботи Лейко Олександр Григорович, д.т.н, професор,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 2021 р. №

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 4 червня 2021 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Огляд джерел інформації, аналіз теоретичного матеріалу, експериментальне дослідження пристроїв для мийки та очищення склотари з використанням звуку.

4. Зміст роботи перелік завдань, які потрібно розробити. Огляд акустичних технологій для очистки посуду. Ефект кавітації. Вимоги та шляхи побудови

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): 4 рисунки, 2 таблиці, презентація.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту(роботи)	Примітка
1	Огляд літератури	20 березня 2021	Виконано
2	Написання 1-го розділу	18 квітня 2021	Виконано
3	Аналіз результатів дослідження	22 квітня 2021	Виконано
4	Написання 2-го розділу	13 травня 2021	Виконано
5	Написання висновків	16 травня 2021	Виконано
6	Оформлення всієї роботи та підготовка презентації	04 червня 2021	Виконано

Студент



(підпис)

Маташин А. І.
(ініціали, прізвище)

Керівник роботи



(підпис)

Лейко О. Г.
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота містить 47 сторінок, 4 рисунків, 14 посилань на літературні джерела та 2 додатки.

Об'єктом дослідження є явище кавітації.

Метою роботи є дослідження можливостей практичного застосування акустичного способу очистки склотари.

Методом дослідження є теоретичне та експериментальне вивчення особливостей та можливостей практичного застосування цієї технології для очищення пляшок.

Ключові слова: мийка склотари, звукове поле, висока інтенсивність.

ABSTRACT

The bachelor's thesis contains 47 pages, 4 figures, 14 references and 2 appendices.

The object of study is the phenomenon of cavitation.

The aim of the work is to study the possibilities of practical application of the acoustic method of cleaning glass containers.

The research method is a theoretical and experimental study of the features and possibilities of practical application of this technology for cleaning bottles.

Key words: glass container washing, sound field, high intensity.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	8
1.1. Доцільність використання акустичних технологій при промисловому очищенні скляного посуду багаторазового використання.	8
1.2. Забруднення та їх взаємодія з кавітацією.....	9
1.3. Ефективність очищення.....	14
1.4. Висновки до першого розділу.....	20
РОЗДІЛ 2. ШЛЯХИ СТВОРЕННЯ АКУСТИЧНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СКЛЯНИХ ПЛЯШОК ВІД ЗАБРУДНЕНЬ.....	21
2.1. Вимоги.....	21
2.1.1. Вимоги до акустичного блоку	22
2.1.2. Основні вимоги до генератора	23
2.2. Варіанти побудови	25
2.3. Експериментальні дослідження процесу очищення скляних пляшок з метою вивчення особливостей функціонування акустичних блоків, а так само вибору оптимального режиму їх роботи.....	28
2.3.1. Експериментальний стенд	28
2.3.2. Експериментальне дослідження процесу очищення.....	31
2.3.3. Експериментальна перевірка функціонування акустичних блоків.....	39
2.4. Висновки до другого розділу	44
ВИСНОВКИ	45
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	47
Додаток 1	48
Додаток 2	51

ВСТУП

Скло – це матеріалі, який не розкладається в природному середовищі. Тому його повторне використання – це не тільки спосіб зниження виробничих витрат, але і ефективний внесок у справу захисту екології.

Склотара обов’язково проходить процедуру очищення перед наступним використанням. Очищення посуду, як правило, здійснюється миючими засобами, які потім після проходження очисних споруд скидаються в природні водойми. Складові миючого засобу не можуть бути повністю видалені в очисних спорудах, що призводить до погіршення екологічної обстановки.

Введення в процеси промислової мийки склотари акустичних технологій може скоротити витрати часу та миючих засобів.

Для досягнення мети було поставлено завдання:

- 1) Провести огляд літератури за тематикою роботи. Та проаналізувати засоби та методи акустичного очищення.
- 2) На основі огляду літератури проаналізувати результати експерименту.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1. Доцільність використання акустичних технологій при промисловому очищенні скляного посуду багаторазового використання.

В сфері харчових продуктів широко використовується поворотна склотара (банки, пляшки і т. п.).

Склотара, повернута після використання на завод-виготовлювач, обов'язково проходить процес мийки та очистки перед наступним використанням. Використана склотара забруднена, переважно, жировими плівками тваринного і рослинного походження (омилюванні жири). а також неомилюючими мінеральними маслами. Тому в харчовій промисловості очищення скляного посуду здійснюється, як правило, в лужних розчинах з добавками інших інгредієнтів. Застосовувані хімічні процеси засновані на омиленні рослинних і тваринних жирів і емульгованих мінеральних масел. Обмилюючи жири під дією лугу розкладаються, утворюючи натрієві солі вищих жирних кислот і гліцерин. Обидва з'єднання добре розчинні у воді при температурі 60-90 градусів Цельсія. Тому, в кінцевому підсумку, із миючої рідини утворюється гарячий колоїдний розчин. Мінеральні ж масла хімічно розкладаються лугами. Для їх видалення зазвичай застосовують спеціальні поверхнево-активні речовини – емульгатори.

Для реалізації цих процесів використовуються конвеєрні миючі машини, в яких використовується значна кількість води зі спеціальними добавками миючих засобів, таких як їдкий натрій, синтетичні миючі засоби, які розчиняються в воді, та інше.

Миючий розчин, використаний при очищенні склотари, після очисних споруд скидається в природні водойми. Розчинені в ній інгредієнти не можуть бути повністю видалені в очищувальних спорудах. В результаті відбувається постійне погіршення екологічної обстановки.

Як показує попередній аналіз літературних даних, очищення поверхонь предметів, обумовлена в основному явищем кавітації, яка виникає в потужних

акустичних полях, є одним із найбільш вивчених і широко застосовуваних акусто-технологічних процесів. Впровадження акустичних технологій в промислові процеси мийки та очищення скляного посуду перспективі повинно дозволити істотно скоротити витрату миючих речовин (але не виключити їх застосування), що, в свою чергу, призведе до поліпшення екологічної обстановки.

Ультразвукове очищення володіє безперечними перевагами в порівнянні з іншими відомими методами видалення забруднень. До них відносяться висока якість очищення, прискорення технологічного процесу очищення, повне або часткове виключення з технологічного процесу миючих поверхнево-активних речовин та інших токсичних інгредієнтів згідно з [1]. З цих причин акустичні технології очищення предметів порівняно давно досліджуються і широко використовуються в різних галузях промисловості. І треба думати, що використання акустичних технологій при промисловому очищенні скляного посуду багаторазового використання так само доцільно.

1.2. Забруднення та їх взаємодія з кавітацією

При проектуванні установок і виборі їх параметрів для досягнення максимальної ефективності очищення виходять перш за все з виду забруднення. Зручно розділяти забруднення за трьома основними ознаками опираючись на джерело [2]:

1. Кавітаційна стійкість забруднення: існують забруднення, здатні тривалий час не руйнуватися як під дією кавітаційних мікро ударів; це, наприклад, жирові плівки на поверхні предмета , що очищається. До кавітаційно-нестійких можна віднести, наприклад, деякі види лаків, фарб, іржі;
2. Ступінь зв'язку забруднення з поверхнею предмета: так, лаки і фарби можуть мати сильну адгезію до поверхні предмета, а можуть її майже не мати.

3. Характер взаємодії забруднення з миючою рідиною: миючий розчин може розчиняти, емульгувати, будь-яким іншим чином діяти на забруднення, або не діяти на нього.

На поверхні скляного посуду найчастіше зустрічаються слабо пов'язані з поверхнею і кавітаційної стійкості жирової плівки, які, як вже було сказано, можуть вступати в хімічну взаємодію з миючими лужними розчинами.

Зустрічаються так само сухі залишки харчових продуктів, які можна віднести до кавітаційно-нестійких, сильно пов'язаних з поверхнею і в тій або іншій мірі розчинними в миючій рідині.

Грязьові плями можна віднести до кавітаційно-стійких, слабо пов'язаними з поверхнею і в тій або іншій мірі розчинними в миючій рідині.

Крім того, підлягають видаленню паперові етикетки приклеєні до поверхні скла, як правило, кукурудзяним клеєм "Дікстрін", а так само алюмінієва фольга або її залишки, скріплені з поверхнею нетоксичними і розчинними (харчовими) клейовими складами.

Видалення кавітаційно-стійких жирових плівок виробляють шляхом збільшення часу впливу кавітуючої рідини на поверхню, що очищається, домагаючись, в кінцевому підсумку, переходу жирів вигляду великих залишків або емульсій в миючий розчин.

Видалення сильно пов'язаних з поверхнею пляшки забруднень обумовлено, в основному, мікроударними навантаженнями, які виникають при закритті нестационарних (колапсуючих) бульбашок. Для видалення слабо пов'язаних з поверхнею забруднень, поряд з нестационарною кавітацією, значну роль відіграють стабільні (пульсуючі) бульбашки і акустичні течії.

Характеризуючи жирові забруднення за третьою ознакою, (характер взаємодії забруднення з миючою рідиною), необхідно відмітити, що при видаленні нерозчинних забруднень швидкість очищення залежить перш за все від інтенсивності кавітації. А ось при видаленні розчинних забруднень істотну роль грають акустичні течії, зокрема, вихрові мікро потоки, які сприяють

перемішуванню розчину в прикордонному шарі і надходженню нових порцій миючого розчину до поверхні, що очищається.

Розглянемо основні процеси, що відбуваються при акустичному очищенні твердих поверхонь від перерахованих вище жирових забруднень.

Відомі три механізми руйнування жирових плівок під дією пульсуючої (стаціонарної) кавітації: це відшарування, струменева очистка і емульгування. Всі механізми були вивчені за допомогою швидкісної кінозйомки і описані в джерелі [3].

У разі *відшарування* пульсуюча бульбашка під дією сил поверхневого натягу прагне прилипнути до поверхні предмета, що очищається. Концентруючись на краях плівки бульбашки можуть «прилипати» не тільки до поверхні, що очищається, але і до країв плівки з боку її внутрішньої поверхні. Після прилипання, при інтенсивних коливаннях бульбашки під дією звукового поля, плівка починає відриватися від поверхні. При цьому, якщо сили зчеплення плівки з поверхнею перевершують міцність самої плівки на розрив, то відбувається відрив невеликої вільної частини плівки. А якщо міцність плівки перевершує сили зчеплення, то плівка відшаровується порівняно великими ділянками, згідно з джерелом [3]. Крім того, стаціонарна бульбашка після ряду пульсацій може закриватися як нестаціонарна, створюючи при цьому ударні хвилі, які призводять до мікро руйнувань плівки забруднень. Це сприяє більш швидкому очищенні поверхні від забруднення.

Струменеве очищення дуже ефективно при видаленні тонких плівок зі слабкою адгезією поверхні. Руйнування плівки відбувається за рахунок багаторазових ударів струменя рідини по плівці.

Виникнення струменів рідини обумовлено нестійкістю сферичної форми бульбашки. Виділяють два основних типи відхилень форми бульбашки від сфери:

- Перший – загальна деформація в "вільному полі".
- Другий – за рахунок близькості твердої границі.

В першому випадку причинами виникнення нестійкості може бути, наприклад, поступальне переміщення бульбашки щодо рідини, наявність значних

градієнтів тиску, дія сили тяжіння т. п. [4]. При цьому поступальний рух бульбашки обумовлено просторовою неоднорідністю звукового поля, що викликає кавітацію. Бульбашки рухаються поступально під дією радіаційного тиску деформуються за рахунок ефекту приєднаної маси відповідно до джерела [5]. Наявність градієнтів тиску так само призводить до сплюснення бульбашки, причому плоска частина поверхні бульбашки розташована з боку максимального тиску і залишається паралельною поверхні постійного тиску [6]. Струмінь рідини виникає також при діленні бульбашок, пульсуючих з великою амплітудою, на більш дрібні що описано в джерелах [5] [7]. Повторно виникаючі бульбашки мають неправильну несферичну поверхню, що призводить до збільшення швидкості мікро потоків.

В другому випадку, коли бульбашка знаходиться поблизу поверхні, що очищається, різні ділянки її поверхні рухаються з різними швидкостями [6]. Найбільшою швидкістю при цьому володіє та частина поверхні бульбашки; яка знаходиться на більшій відстані від поверхні, яка очищається, що призводить до її суттєвої деформації. А ось з боку перешкоди поверхня, як би загальмовується. Віддалена частина поверхні бульбашки «наїжджає» на загальмовану і, в підсумку, кривизна загальмованої її частини поверхні переходить через нуль і стає негативною. В результаті схлопування такої бульбашки виникає кумулятивний мікро струмінь рідини, спрямована в сторону твердої поверхні, що очищається. Діаметр такого струменю складає приблизно 0.1 від діаметра бульбашки, її швидкість може становити від декількох сотень до декількох тисяч метрів в секунду, а тиск, який чиниться нею на зовнішніх поверхнях, оцінюється значеннями близько 300 МПа опираючись на джерело [8]. Тому такі струмені можуть бути одним з істотних факторів, що викликають руйнування плівки забруднення.

Емульгування в'язких плівок хімічно нейтральних середовищах описано, наприклад, в джерелі [2]. Емульгування – це процес переходу одного із взаємно нерозчинних речовин в дрібнодисперсний стан перебуваючи в середовищі іншої речовини (миючого розчину). Детальний опис механізму утворення крапель емульсії під дією кавітації в літературі не зустрічаються. Однак існує ряд гіпотез.

За однією з них цей процес відбувається наступним чином : кавітація сприяє руйнуванню масляної плівки, після чого масло збирається в крапельки під дією сил поверхневого натягу. Крапельки, в свою чергу, пульсуючими бульбашками відриваються від тіла (що очищається) , утворюючи на своїй поверхні, за рахунок дії тих же сил поверхневого натягу, міцний адсорбційний шар, який оберігає емульсію від розшаровування. Крім того бульбашки, руйнуючи плівку забруднення, проникають в її товщину, змінюють її фізико-механічні властивості, зменшують сили поверхневого натягу і міцність зчеплення плівки з поверхнею, що полегшує процес очищення.

Згідно з іншою гіпотезою, в процесі схлопування, бульбашка відриває жирові крапельки від загальної маси плівки забруднення і захоплює їх за собою. Емульгування, так само відбувається за рахунок розпаду на крапельки мікро потоків рідини, які утворюються при несиметричному схлопуванні бульбашок або при порушенні сферичної форми пульсуючих бульбашок.

В цілому, для знежирення найбільш істотну роль грають об'ємна густина акустичної енергії та склад водного розчину миючої рідини (ВМР). Застосування ультразвуку дозволяє в кілька разів скоротити зміст хімічно активних добавок в ВМР. При цьому для видалення слабо пов'язаних з поверхнею забруднень необхідна об'ємна концентрація енергії в розмірі 10-20 ват на один кубічний дециметр об'єму ВМР в місці розташування предмета, що очищається. А для видалення сильно пов'язаних з поверхнею забруднень та (або) їх емульгування, об'ємну щільність енергії необхідно підвищувати до

Вище, крім жирових плівок, був згаданий інший вид забруднень це сухі залишки харчових продуктів і грязьові плями. По відношенню до них, відомості, наведені по процесам знежирення, дозволяють зробити висновок, що забруднення цього виду повинні віддалятися з поверхні, що очищається легше, ніж жирові плівки. Тобто, якщо той чи інший режим акустичного блоку дозволяє видалити жирові плівки, то грязьові плями і сухі залишки харчових продуктів будуть видалені безумовно.

Що ж стосується паперових етикеток приклеєних до поверхні скла, як правило, легко розчинним у воді кукурудзяним клеєм «Дікстрін», а так само алюмінієвої фольги або її залишків, скріплених з поверхнею розчинними у воді нетоксичними (харчовими) клейовими складами, то будемо вважати, що для їх видалення необхідно збурити стаціонарну кавітацію в шарі між папером (фольгою) і поверхнею скла. Після чого пульсуючі бульбашки повинні поступово руйнувати клейову плівку, а акустичні течії повинні сприяти розчиненню клею в миючому розчині.

Таким чином проведений короткий літературний пошук показує, що при акустичному знежирюванні поверхонь скляного посуду основну роль грає нестаціонарна і стаціонарна кавітація, а так само акустичні течії.

1.3. Ефективність очищення

Розглянемо тепер існуючі підходи до оцінки ефективності очищення в залежності від параметрів звукового поля, характеристик миючої рідини, а так само зовнішніх факторів.

Прийнято вважати, що ефективність очищення визначається перш за все кавітаційною активністю стаціонарно і нестаціонарно пульсуючих бульбашок, а також швидкістю акустичних течій. Крім того, розділяють поняття кавітаційної (сумарної) ерозійної активності. Під ерозійною активністю одиначної бульбашки розуміють відношення потужності, що витрачається на формування ударної хвилі до потужності, накопичується тією ж окремою бульбашкою протягом одного періоду коливань. Якщо допустити, що вся робота, що витрачається на зростання бульбашки до розміру $R_{\max}$ в процесі схлопування до розміру $R_{\min}$ витрачається тільки на утворення ударної хвилі, то ерозійну активність можна характеризувати параметром T/t , де T – період коливань бульбашки, t – час, протягом якого накопичена бульбашкою енергія переходить в енергію ударної хвилі. В експерименті час t визначити практично неможливо. Тому його, частіше за все, замінюють розрахунковим значенням Релеєвського часу закривання

опираючись на джерело [4]. Крім того, для нестаціонарних (колапсуючих) бульбашок кавітаційна активність повинна оцінюватися ще і енергозатратами акустичних течій, виникаючих при несиметричному схлопуванні бульбашок.

Як ерозійна активність так і акустичні течії істотно залежать від поведінки кавітаційних кластерів – скупчень кавітаційних бульбашок, що займають певну частину простору в миючій рідині. Бульбашки в кластері рухаються поступально за рахунок градієнтів тиску [5], взаємодіють між собою [9] [10], спливають на поверхню рідини [11], здійснюють інші просторові еволюції. Просторові форми кавітаційного кластера залежать від конкретних умов протікання кавітаційного процесу.

Закінченої теорії динаміки кавітаційного кластера не існує. Але вивчення поведінки кластерів при помірних амплітудах тисків виконують, базуючись на вивченні рухів одиночної бульбашки описаної в джерелах [4] [5] [11]. В цих роботах, а також, наприклад, в роботі [12] показано що найбільший вплив на поведінку бульбашки дає амплітуда акустичного тиску. У згаданих роботах показано, що зі збільшенням амплітуди тиску неоднозначно впливає на ерозійну активність бульбашки. Так з джерел [4] [5] відомо, що кавітаційні процеси в рідині починаються лише при амплітудах тиску P_a , що перевищують деяке порогове значення $P_{п}$. Прийнято вважати, що існує кілька порогів кавітації, опираючись на джерела [4] [5] [11] [12]. Але, як правило, більшість авторів виділяють два порога. Це поріг стабільної (стаціонарної) кавітації і поріг нестабільної (нестационарної) кавітації. Поріг стаціонарної кавітації – це інтервал акустичних тисків, в якому можуть існувати пульсуючі (стаціонарні), «довго живучі» бульбашки. Поріг нестаціонарної кавітації – це область акустичних тисків в якій існують нестабільні колапсуючі (нестационарні), «короткоживучі» бульбашки.

Чисельні значення тиску, що відповідає цим порогах, залежать перш за все від рідини, а так само від багатьох інших факторів. До таких факторів відносять, перш за все, розподіл зародків кавітації за розмірами. Так в роботі [11] обґрунтовано існування такого тиску, нижче якого дуже дрібні бульбашки просто розчиняються в рідині; з підвищенням тиску бульбашки, радіуси яких більше

якогось порогу зростання бульбашок, починають рости. Для фіксованого початкового радіуса швидкість росту бульбашки залежить від того, наскільки амплітуда звукового тиску перевищує поріг зростання бульбашок, причому найбільшу швидкість росту мають резонуючі бульбашки. У разі стаціонарної кавітації розподіл бульбашок за розмірами обернено пропорційний швидкості їх зростання [11], тому в кавітаційному кластері, як правило, мало або зовсім немає резонансних бульбашок.

При подальшому збільшенні тиску бульбашки починають рости, і, в кінцевому підсумку можуть швидко досягати резонансних розмірів. Бульбашка максимального радіуса може спливати на поверхню, виходячи області дії акустичного поля (цей процес відомий як дегазація), або розпадатися на безліч бульбашок менших радіусів. Серед новоутворених можуть існувати бульбашки, колапсуючі при діючому акустичному тиску. Отже, зі збільшенням тиску відбувається збільшення ерозійної активності.

Якщо тиск продовжує збільшуватися, то бульбашка потрапляє в область нестаціонарної кавітації (колапсу). Тут його зхлопування починається в стадії розрідження, що послаблює інтенсивність виникаючих ударних хвиль. Крім того, бульбашка може виродитися в пульсуючу, що призводить до зменшення ерозійної активності одиночної бульбашки. Саме для таких бульбашок в роботі [13] введений новий поріг кавітації, вище якого колапсуюча бульбашка коливається як пульсуюча.

Однак, при зменшенні ерозійної активності одиночної бульбашки, за умови збільшення акустичного тиску, зростає число бульбашок, які з'являються із зародків все менших початкових радіусів. З іншого боку, зі зростанням амплітуди тиску відбувається збільшення кількості нестаціонарних бульбашок, які стають пульсуючими. Тому при зростанні тиску ерозійна активність повинна мати екстремум. Значення тиску, вище якого загальна ерозійна активність починає спадати залежить від багатьох діючих факторів, і в конкретних випадках повинна визначатися експериментально.

Амплітуда акустичних тисків визначає одну з найважливіших технічних характеристик ультразвукових мийок – інтенсивність акустичного поля. За даними роботи [6] інтенсивність недоцільно підвищувати більш ніж до 2.5 Вт на квадратний сантиметр. При більшій інтенсивності відбувається екранування поля кавітаційним кластером поблизу поверхні випромінювача, що призводить до змін режиму навантаження перетворювача і генератора. В результаті може різко зростати витрата енергії. Однак, таке твердження справедливе лише для процесів, метою яких є досягнення максимальної ерозійної активності.

Істотний вплив на динаміку кластера надає частота акустичного поля. Збільшення частоти призводить до зменшення часу росту бульбашки, а, отже і до зменшення максимального радіуса (при фіксованій амплітуді). Зниження частоти призводить до підвищення тиску парогазової суміші в бульбашці до моменту початку його захоплювання, що, в свою чергу призводить до зниження інтенсивності виникаючих ударних хвиль, тобто до зменшення ерозійної активності. Так в роботі [3] показано, що ерозійна активність бульбашки лінійно падає з ростом частоти в діапазоні 18-50 кГц.

Зміни частоти коливань впливають на просторову конфігурацію кавітаційних кластерів, на їх розташування та активність, крім того, від частот залежать динаміка поодинокі бульбашки і пороги кавітації. В цілому видно, що при збільшенні частоти потрібна вища інтенсивність поля, що призводить до погіршення якості очищення. Однак, зі зростанням частоти збільшується швидкість акустичних течій, що сприяє видаленню слабо зв'язаних з поверхнею забруднень. Навіть якщо знехтувати впливом стаціонарних (пульсуючих) бульбашок, то все одно збільшення швидкості течій повинно призводити до зростання кавітаційної активності за рахунок дії нестаціонарних (колапсуючих) бульбашок. Здавалося б, що на кавітаційну активність зміна частоти, як і зміна амплітуди, впливають двояко. І можна припускати існування певної оптимальної частоти. Таке припущення було висловлено в роботі [4], в якій висловлюється припущення про те, що кавітаційна активність буде найбільшою поблизу частоти резонансу бульбашки, радіус якого відповідає максимуму в розподілі зародків за розміром

радіуса. Однак спроби експериментально виявити такий оптимум в роботах [4] [5] [11] не дали підтвердження цієї гіпотези.

Більшість діючих промислових установок працює на частотах 18-22 кГц. При очищенні в розчинниках використовують більш високі частоти 40-80 кГц. В цілому, відзначимо, що нижня частина цього діапазону використовується для очищення забруднень, сильно пов'язаних з поверхнею, а верхня його частина – для очищення забруднень, слабо пов'язаних з поверхнею.

Наступна група факторів, що впливають на кавітаційну активність, відноситься до миючого розчину. В даному випадку немає необхідності детально зупинятися на таких параметрах розчину миючої рідини як щільність, в'язкість і поверхневий натяг. Відзначимо тільки, що в роботі [3] показано, що при збільшенні значень всіх цих трьох параметрів на порядок ерозійна активність бульбашки змінюється не більше ніж на 10%. Але незважаючи на такий малий внесок, при акустичному знежирюванні прагнуть використовувати розчини з можливо меншою в'язкістю, зниженим поверхневим натягом і можливо меншою густиною. Окрім того, особливу увагу приділяють тиску пари, що утворюється усередині бульбашок. Останнє пов'язано з тим, що з ростом тиску пара ерозійна активність бульбашки швидко падає. Так зі збільшенням тиску на порядок, – ерозійна активність знижується на п'ять порядків. Це пов'язано з тим, що тиск пари зберігається, практично незмінним протягом усього часу розширення бульбашки. А при максимальному розширенні бульбашки тиск пари значно перевищує тиск газу, що знаходиться так само усередині бульбашки, отже, тиск пари повністю визначає значення сил, які протидіють закриттю. З цих причин при очищенні стараються застосовувати водні розчини, пароутворення в яких нижче, ніж в, наприклад, органічних розчинниках [14].

До наступної групи факторів, що впливають на кавітаційну активність, відносять зовнішні умови, такі як гідростатичний тиск, температура миючого розчину, а так само вміст газу.

При встановленні залежності кавітаційної активності від температури миючої рідини враховують, що з підвищенням температури збільшиться до певних

меж хімічна активність рідини; одночасно знижується поверхневий натяг і в'язкість, а тиск насиченого пару підвищується. Так як пружність пари, як зазначено вище, робить вирішальний вплив на ерозійну активність одиничної бульбашки, то зі збільшенням температури ерозійна активність повинна падати. У той же час, із зростанням температури зростає кількість зародків кавітації, тому ерозійна активність миючого розчину в цілому повинна збільшуватися. Окрім того, просторові розміри кавітаційного кластера можуть збільшуватися за рахунок теплових флуктуацій бульбашок. Тому існує деяка оптимальна температура миючої рідини, при якій ерозійна активність кластера – максимальна. Максимум хімічної активності миючих рідин, як правило досягається при більш високих температурах, ніж максимум активності ерозійних. Так, при акустичному знежирюванні в слабо концентрованих лужних водних розчинах використовують температури 40-60 градусів Цельсія, а при стандартному знежирюванні в лужних розчинах (без використання акустичних технологій) Використовуються температура 70-90 градусів Цельсія.

Суттєвий вплив на кавітаційну активність також надає гідростатичний тиск рідини. У ряді робіт [4] [5] [11] показано, що існує оптимальне значення гідростатичного тиску для фіксованої частоти і амплітуди акустичного тиску. Підвищення тиску дозволяє збільшити швидкість закривання бульбашки. В результаті підвищення гідростатичного тиску до значень 5-10 атм. призводить до збільшення ерозійної активності на 2-3 порядки. У той же час підвищення тиску призводить до зростання порогів кавітації, до зменшення кількості зародків кавітації, і також до зменшення кількості пульсуючих бульбашок. А якщо гідростатичний тиск перевищує акустичний, то умов виникнення кавітації немає зовсім. Однак, збільшення гідростатичного тиску за своїм впливом на ерозійну активність істотно перевершує зміни в будь-яких межах всіх інших параметрів. До того ж дія факторів, які зменшують ерозійну активність, проявляється лише для фіксованих значень акустичного тиску. Тобто, якщо підвищувати акустичний тиск одночасно з падінням ерозійної активності, то сумарна кавітаційна активність буде зростати. Єдине обмеження на таке підвищення накладається перетворювачами, які

не можуть забезпечити акустичний тиск вище своєї конструктивної межі. Наряду зі зростанням ерозійної активності, при збільшенні гідростатичного тиску зростає швидкість акустичних течій і, в багатьох випадках, зростає хімічна активність рідини. Слід відзначити також, що для збільшення тиску потрібно збільшувати електричну потужність, однак при цьому ерозійна активність зростає пропорційно четвертому ступеню акустичного тиску, а електрична потужність – тільки його другого ступеню. Таким чином, збільшення гідростатичного тиску дозволяє створити умови для видалення, практично будь-яких забруднень з досить високою швидкістю.

В багатьох роботах, наприклад [4] [5] [11], передбачається існування деякого оптимального значення вмісту газу в рідині. Так, при підвищеному вмісті газу пороги кавітації знижуються і при вмісті газу близько п'яти відсотків пороговий тиск змінюється обернено пропорційною концентрації. А при менших концентраціях порогове значення тиску змінюється повільніше і, в границі, прагне до граничного значення для дегазованої рідини. Інші фактори (крім згаданих вище) надають суттєво менший вплив на динаміку і поведінку кавітаційного кластера.

1.4. Висновки до першого розділу

Проведений літературний огляд дозволяє показати, що процес очищення, в кінцевому підсумку, повинен дозволити видаляти з зовнішньої і внутрішньої поверхні, наприклад, пляшки – забруднення у вигляді слабо пов'язаних з поверхнею і кавітаційно стійких жирових плівок рослинних і тваринних жирів, а також мінеральних масел. Крім того, підлягають видаленню сухі залишки харчових продуктів і грязьові плями, а так само паперові етикетки (приклеєні до поверхні скла).

Отже, можна перейти до вироблення конструктивних вимог до макетів акустичних блоків, призначених для практичного вирішення завдання розробки акустичних технологій миття і очищення скляної тари багаторазового використання.

РОЗДІЛ 2. ШЛЯХИ СТВОРЕННЯ АКУСТИЧНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СКЛЯНИХ ПЛЯШОК ВІД ЗАБРУДНЕНЬ.

2.1. Вимоги

Необхідно створити кавітаційний кластер в об'ємі миючої рідини, розмістити пляшку, що очищується, займаному кластером місці, і добитися достатнього рівня кавітаційної активності кластера. Крім того, необхідно враховувати, що розміщення очищувального предмета (пляшки) в кластері може призвести до змін як його просторових форм, так і його динаміки.

Основними процесами, ініційованими в кластері, повинні бути стаціонарна і (або) нестаціонарна кавітація, а так само акустичні течії. Крім того, повинні бути вжиті заходи щодо оптимізації загальної кавітаційної активності кластера.

Оптимізацію кавітаційної активності кластера слід проводити:

- за параметрами акустичного поля,
- за складом розчину миючої рідини, а так само по її параметрам (таким як щільність, в'язкість і поверхневий натяг)
 - по зовнішнім факторам, таким як
 - гідростатичний тиск,
 - температура миючого розчину,
 - вміст газу миючого розчину.

Оптимізація за параметрами акустичного поля повинна проводитися з урахуванням особливостей роботи акустичних перетворювачів, є навантаженням для генератора і тому визначають його енерго віддачу.

А при виборі варіантів побудови технологічних вузлів в цілому, слід особливу увагу звернути на вартість блоків, їх функціональну придатність, терміни служби і вартість їх експлуатації.

Що ж стосується вибору характеристик і параметрів розчину миючої рідини, а так само зовнішніх умов, то тут перш за все необхідно відштовхуватися від тих

параметрів, які застосовуються для діючих ліній очищення посуду, в які планується вбудовувати вузли, що реалізують акустичну технологію.

2.1.1. Вимоги до акустичного блоку

Вироблення основних вимог до конструкції технологічного вузла будемо виконувати, притримуючись викладеної послідовності пошуку оптимальних конструктивних рішень.

Перш за все, акустичний блок повинен дозволити створити в об'ємі миючої рідини кавітаційний кластер, просторові форми і розміри якого дозволили б розмістити в ньому, наприклад, пляшки, що очищаються. Тобто, в деякій частині об'єму зайнятого миючою рідиною випромінювач (система випромінювачів) повинен створювати акустичний тиск, що перевищує поріг кавітації. Причому кластер повинен існувати як поза очищувального предмета (пляшки), так і у внутрішньому об'ємі.

Що ж стосується одиночного випромінювача, то його основна функція – протягом всього терміну експлуатації віддавати необхідну акустичну потужність, яка, як було показано, для основного виду кавітації – стаціонарної (пульсуючої), оцінюється значеннями 1-3 вата на квадратний сантиметр. При виборі робочого діапазону частот слід спиратися на міркування, висловлені в розділі 1, про те, що зі збільшенням частоти в межах від 18 кГц до 40 кГц при інших фіксованих параметрах, кавітаційна активність кластера – падає. З цієї причини, в якості основної робочої частоти може бути обрана частота, яка перебуває на початку зазначеного діапазону.

Таким чином, основні вимоги до перетворювачів можуть бути сформульовані наступним чином:

- перетворювачі повинен мати резонансну частоту близько 18 кГц;

- конструкція корпусу перетворювача повинна дозволяти вбудовувати його в корпус ванни, призначеної для очищення скляного посуду.
- коефіцієнт корисної дії перетворювача по тиску на резонансній частоті повинен бути не менше 0.3
- для включення в акустичну систему перетворювач повинен закінчуватися двома виводами "+" і "-";
- перетворювач повинен забезпечувати питому випромінювану акустичну потужність не менше 1-го Вата на квадратний сантиметр поверхні, що випромінює;
- Середній термін служби перетворювача не менше двох років при щоденній експлуатації;
- Виконання перетворювача має бути таким, щоб перетворювач міг працювати протягом всього терміну експлуатації в агресивній лужній рідині при температурі не менше 60 градусів Цельсія;
- Кріплення перетворювача до корпусу ванни повинно забезпечувати жорсткість і герметичність стиків,
- перетворювачі повинні бути розміщені в дні і (або) стінках ванни таким чином, щоб поблизу їх поверхні існувала область з акустичним тиском, що перевищує поріг кавітації.

Вимоги до виконання, призначеному для важких умов експлуатації (агресивна лужна рідина температурою не менше 60° C) можуть призвести до необхідності застосування магнітострикційних випромінювачів.

2.1.2. Основны вимоги до генератора

Основні вимоги до генератора повинні бути сформульовані з урахуванням основних вимог до випромінювача. Завдання генератора – збудження п'єзокерамічних перетворювачів з яких зібраний акустичний блок. Мета збудження – створення потужних акустичних полів.

Генератор повинен забезпечити порушення перетворювачів гармонійним або тон-імпульсним сигналом у вузькому діапазоні частот поблизу частоти резонансу перетворювачів, тобто в діапазоні робочих частот 16 - 25 кГц. При цьому електрична потужність генератора повинна забезпечувати питому випромінювану акустичну потужність, що віддається перетворювачами, не менше 2 ват на квадратний сантиметр поверхні, що випромінює (з запасом); а конструкція генератора повинна забезпечувати дискретне і плавне регулювання цієї потужності.

Генератор повинен забезпечити порушення перетворювачів гармонійним або тон-імпульсним сигналом у вузькому діапазоні частот поблизу частоти резонансу перетворювачів, тобто в діапазоні робочих частот 16 - 25 кГц. При цьому електрична потужність генератора повинна забезпечувати питому випромінювану акустичну потужність, що віддається перетворювачами, не менше 2 ват на квадратний сантиметр поверхні, що випромінює (з запасом); а конструкція генератора повинна забезпечувати дискретне і плавне регулювання цієї потужності.

Крім того, з метою оптимізації режиму роботи перетворювачів, в схемі генератора потрібно передбачити можливість автоматичного підстроювання частоти по максимуму струму, що протікає через систему п'єзокерамічних перетворювачів. А також схему, що дозволяє генератору віддавати максимально можливу потужність при роботі на конкретну систему перетворювачів.

Слід також враховувати можливість виходу з ладу перетворювачів у процесі роботи, тому генератор повинен зберігати працездатність при зміні опору навантаження в 2-5 раз.

У виконанні генератора повинна бути передбачена можливість його сполучення з зовнішніми керуючими пристроями. Така можливість необхідна для сполучення технологічного вузла з діючою лінією по очищенню.

У зв'язку тим, що технологічний вузол повинен експлуатуватися в цехах, де розміщено інше технологічне обладнання, загальні технічні вимоги можна сформулювати наступним чином:

- генератори повинен надійно працювати в діапазоні температур навколишнього повітря від +10 до +50 градусів Цельсія при його дуже високій вологості (до 100%), що відповідає мікроклімату мийного цеху;
- електроживлення генератора – мережа 220 В 50 Гц;
- виконання генератора – електробезпечне;
- з метою зменшення масо габаритних показників, електроживлення підсилювачів потужності ультразвукових генераторів повинно здійснюватися по без трансформаторній схемі.

2.2. Варіанти побудови

Вибір варіантів побудови технологічних вузлів проводився на основі таких міркувань:

- в зв'язку з тим, що скляний посуд підлягає багаторазовому використанню, не можна допускати його механічний контакт з випромінюючою поверхнею перетворювача, оскільки в цьому випадку в склі можуть утворюватися мікротріщини, що в кінцевому підсумку призведе до передчасного руйнування пляшки, тому прийнятним є лише метод занурення в ванну;
- розташування випромінювачів в дні або стінках ванни може дозволити створити кавітаційний кластер і управляти його кавітаційною активністю.

Кавітаційний кластер у внутрішньому просторі пляшки і біля її зовнішньої поверхні можна створювати різними способами (в літературі зустрічається опис великої кількості різноманітних конструкцій, однак при виконанні оглядів, конструкції, призначені конкретно для очищення скляних предметів, не виявлені).

При аналізі можливих шляхів створення кластера, спочатку було висловлено припущення про те, що скло є ерозійною перешкодою для проникнення акустичних коливань всередину пляшки. Його "звукопрозорості" по тиску оцінюється коефіцієнтом $k = 0.1-0.3$.

До розгляду були прийняті два підходи до вибору варіантів конструктивного вирішення цього завдання.

Схематичне зображення першого варіанта представлено на рис. 1, тут випромінювач нарощується тонким концентратором – хвилеводом, який вставляється у внутрішню порожнину пляшки (варіант а). При цьому завдання хвилеводу – збудити кавітацію у внутрішній порожнині. Інша можливість в цій схемі – використовувати не хвилевід, а спеціально розроблені тонкі циліндричні перетворювачі (варіант б).

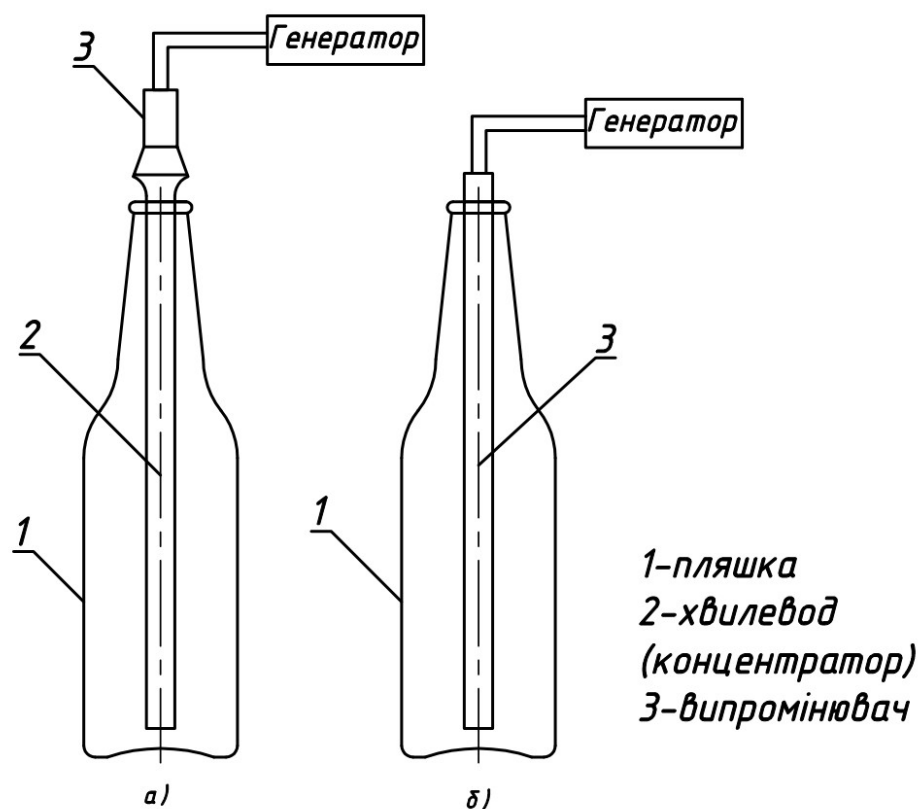


Рис. 1. Варіант з введенням хвилевода (а) або циліндричного перетворювача (б) у внутрішню порожнину пляшки.

При детальному аналізі в такому конструктивному рішенні виявляється ряд недоліків. Перш за все потрібно виконати розрахунки, розробку, конструювання та макетування тонкого циліндричного випромінювача. При цьому неможливо гарантувати позитивний результат експериментальних робіт хоча б тому, що за попередньою оцінкою, резонансна частота такого перетворювача повинна знаходитися в діапазоні 100-300 кГц. При таких частотах для перевищення порога

стаціонарної (пульсуючої) кавітації необхідно "закачувати" в перетворювач електричну потужність істотно більшу, ніж при частотах 18-40 кГц, що, в свою чергу, може призвести до передчасного виходу перетворювача із ладу.

Що ж стосується хвилеводу, то, перш за все, великі труднощі повинна викликати розробка (розрахунок і виготовлення) такої конструкції, основним завданням якої є випромінювання звуку в поперечному напрямку, тобто досить інтенсивної бокової хвилі. Причому в цьому випадку також неможливо гарантувати позитивний результат експериментальних робіт.

Крім того, що б вставити хвилевід (випромінювач) в шийку пляшки необхідно розробляти і вбудовувати в діючі лінії спеціальні точні механізми і інші спеціальні вузли (що призводить до різкого збільшення вартості всієї розробки). А механічний контакт випромінюючої поверхні перетворювача або хвилеводу з поверхнею пляшки може привести до появи мікротріщин в склі і, відповідно, до зменшення кількості оборотів пляшки по шляху від одного заповнення харчовим продуктом – до іншого.

У результаті такого короткого аналізу варіант введення акустичних коливань у внутрішню порожнину пляшки за допомогою випромінювача або хвилеводу слід відкинути.

Другий підхід до вибору варіантів конструктивного рішення задачі полягає в підводі акустичної енергії за допомогою перетворювачів розташованих по краях ванни і формуванні з їх допомогою кавітаційного кластера, що має необхідні просторові форми. Цей підхід може бути реалізований в наступних трьох варіантах конструктивного рішення акустичного блоку.

Перший з цих варіантів передбачає розміщення перетворювачів в дні ванни.

Другий – розміщення групи перетворювачів на стінках ванни.

Третій – розміщення групи перетворювачів по висоті ванни при повному зануренні корпусів випромінювачів в миючий розчин.

Перший з цих варіантів широко застосовується в промисловості. Тому спеціальна розробка не потрібна, а для експериментальної перевірки можливостей

мийки та очищення скляного посуду можна використати одиночний перетворювач, занурюваний в ванну разом з предметом, який очищається.

Основна ідея другого і третього варіантів – створення кавітаційного кластера, що має симетричні просторові форми. У цьому випадку існує можливість створити таке поле, фазові фронти якого будуть збігатися з поверхнею пляшки, тобто забезпечити нормальне падіння звуку на скляну поверхню циліндричної форми. Така конструкція поля повинна сприяти кращому проникненню звуку у внутрішню порожнину пляшки.

Третій варіант конструктивного рішення акустичного блоку розроблений з метою реалізації тієї ж ідеї, що і другий варіант. Тут, в деякій області поля створюється фокальна пляма, тиск в якій досягає порогу кавітації за рахунок ефекту фокусування акустичних коливань. Кілька перетворювачів утворюють фокусувальну акустичну систему з зовнішнім кутом розкриття близько 120 градусів. Так само як і в другому варіанті предмет розміщується в фокальній зоні, що з одного боку має забезпечувати гарні умови для проникнення звуку в пляшку, а з іншого – дозволяє знімати з поверхні перетворювачів меншу акустичну потужність.

2.3. Експериментальні дослідження процесу очищення скляних пляшок з метою вивчення особливостей функціонування акустичних блоків, а так само вибору оптимального режиму їх роботи.

2.3.1. Експериментальний стенд

Для виконання експериментальних досліджень процесу очищення скляних пляшок, а так само для вивчення особливостей функціонування акустичних блоків і вибору оптимальних режимів їх роботи був застосований спеціальний стенд, блок-схема якого приведена на рис. 2.

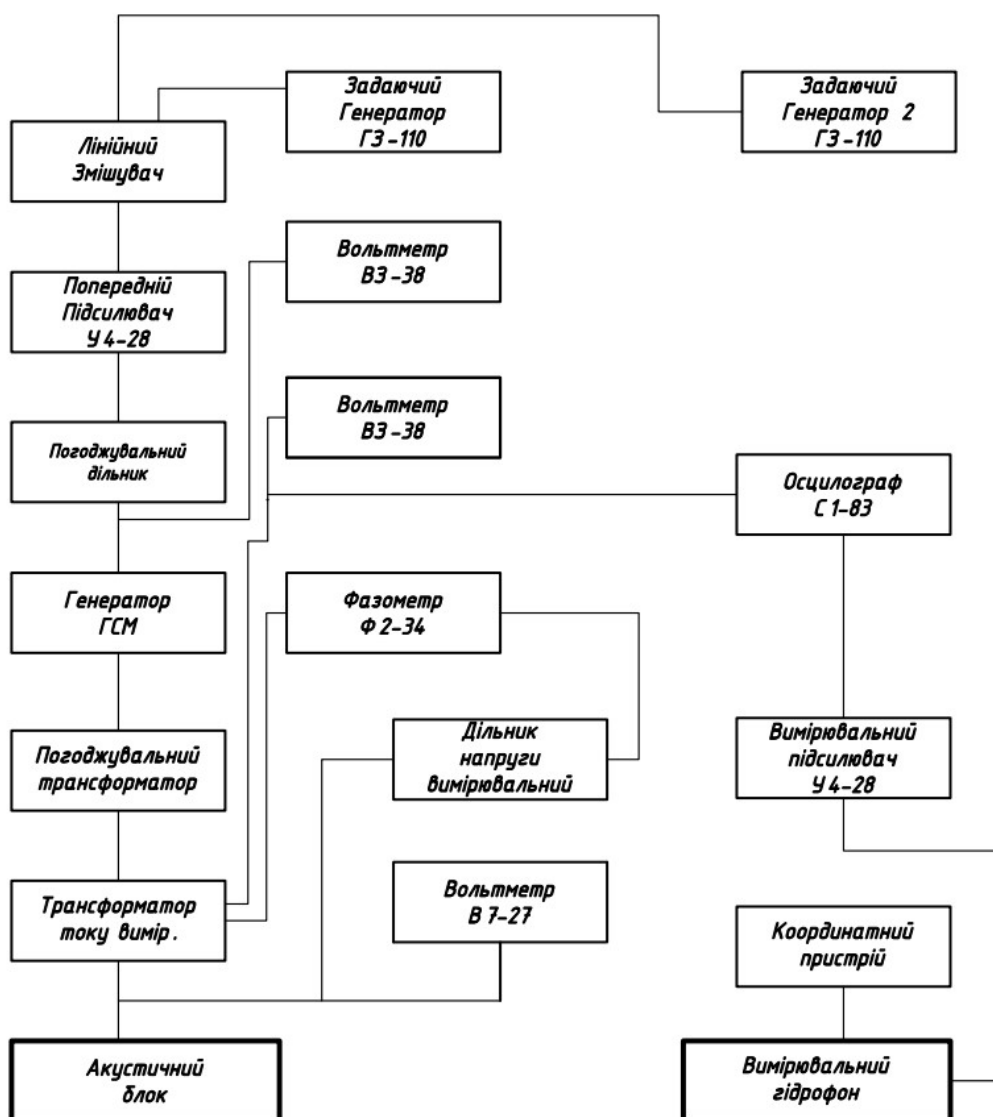


Рис 2. Структурна схема стенду.

Стенд призначений для збудження акустичного блоку спеціально формованим електричним сигналом для контролю параметрів тонального сигналу збудження, а так само для вимірювань акустичного тиску, створюваного акустичним блоком в миючому розчині при малих рівнях сигналу збудження (в лінійному режимі) і для орієнтовної оцінки кавітаційної активності за допомогою спостереження за сигналом на виході вимірювального гідрофону.

Стенд функціонує наступним чином: тональний сигнал обраної частоти від одного з задають Генераторів через Лінійний Змішувач подається на вхід Попереднього Підсилювача, з виходу якого, через Узгоджувальний Дільник

потрапляє на вхід підсилювача потужності. Після посилення, сигнал, через узгоджувальний трансформатор подається на акустичний блок. У земляну Шину лінії високої напруги (лінії сигналу збудження акустичного блоку) включена первинна обмотка вимірювального Трансформатора струму. Використання Трансформатора струму має коефіцієнт перетворення струму в напругу $k=1$ [В/А] і похибка по фазі трансформованого сигналу не більше одного градуса в діапазоні частот від 10 до 50 кГц, дозволяє досить точно проводити вимірювання амплітуди струму в акустичному блоці, а також фази струму щодо фази напруги. Причому вимірювання можна проводити в процесі роботи стенда при проведенні експериментів по кавітаційному очищенню. Струм, перетворений в напругу подається на один з входів Фазометр Ф2-34, а напруга збудження через заземлений і екранований активний дільник напруги (тобто, практично, без похибки по фазі) подається на інший вхід. При цьому вимірювальна схема, його практично не вносить спотворень в сигнал збудження і не змінює електричні параметри ланцюга (активний опір первинної обмотки трансформатора струму менше одного ома). Напруга збудження Акустичного блоку контролюється високовольтних Вольтметром В7-27, а для вимірювання амплітуди струму (після трансформації струму в напругу) використовується Вольтметр В3-38. Для спостереження форми струму використовується один з каналів двопроменевого осцилографа С1-83. На інший канал цього осцилографа подається посилений сигнал вимірювального гідрофону. Якщо при включенні другого задаючого генератора встановити на ньому частоту що відрізняється на декілька герц (десятків герц) від частоти першого задаючого генератора, то на виході лінійного змішувача отримаємо гармонійний сигнал з биттям на частоті, рівній різниці частот задаючих генераторів. Така можливість дозволяє не включати до складу стенду хронізатор-модулятор імпульсних сигналів, а працювати в "квазі-імпульсному" режимі.

Експериментальні дослідження процесу очищення скляних пляшок, а також вивчення особливостей функціонування акустичних блоків і підбір оптимальних режимів їх роботи виконувалися на цьому стенді з використанням виготовлених макетів акустичних блоків.

Можливість проведення досліджень саме на стенді, без використання спеціально розробленого генератора обумовлена широкими можливостями стенду, що полягають в широкому діапазоні частот підсилювача потужності ГСМ (20 Гц - 200 кГц) і наявності узгоджувального трансформатора, розрахованого для узгодження вихідного опору підсилювача з опором навантаження, що змінюється в межах від 5 Ом до 1 кОм. Це дозволяє використовувати як навантаження генератора різноманітні акустичні блоки. Крім того, використання стенду дозволяє легко міняти групу приладів задаючої частини, а також, наприклад, охоплювати ГСМ і акустичних блок струмів зворотним зв'язком. Останнє може виконуватися з метою визначення власних резонансних частот тракту при автоматичному обліку умов роботи акустичного блоку і самостійного "підстроювання" всієї системи під конкретне навантаження.

2.3.2. Експериментальне дослідження процесу очищення

Як уже зазначалося, макет перетворювача (або хвилеводу), зануреного у внутрішню порожнину пляшки (Рис. 1) – не виготовлявся і його експериментальні дослідження не проводилися.

Перша серія експериментів була проведена на макетах з концентраторами у вигляді перевернутого рупора і з вставленої в гирлі рупора заповненої водою пляшки, занурюється в ванну з водою. Перед заповненням водою на внутрішню поверхню пляшки були нанесені забруднення у вигляді плям солідолу, соняшникової олії, водоемульсійної фарби і клею "Дікстрін". Перед включенням генератора пляшка, занурена в ванну, була висвітлена джерелом яскравого освітлення, а на забруднення, нанесені на її внутрішню поверхню, був спрямований окуляр мікроскопа зі збільшенням в 80 разів. Крім того, у внутрішню порожнину був введений контрольний гідрофон, чутлива голівка якого розташовувалася в центральній частині внутрішньої порожнини. Випромінювач підключався до стенду і збуджувався гармонійним сигналом на резонансній частоті

перетворювачів $f = 16.7$ кГц. Напруга сигналу змінювалося в межах від 10 В до 150 В.

Результати експериментів показали, що, починаючи з напруги збудження $U = 20-30$ В амплітуда сигналу на виході вимірювального гідрофону практично не змінюється. А спостереження за поведінкою плям забруднення (під мікроскопом) показали, що забруднення практично не реагують на акустичний тиск створений в гирлі пляшки. Кавітуючі (пульсуючі) бульбашки спостерігалися на відстані не більше одного сантиметра від гирла пляшки. На цій підставі був зроблений висновок про те, що кавітаційний кластер, що утворюється в горловині концентратора, створює екран, що складається з кавітуючих бульбашок. Цей екран не дозволяє акустичним коливанням проникати у внутрішню порожнину пляшки. Тобто за допомогою концентратора неможливо створити умови існування кластера в усьому внутрішньому просторі, який підлягає очищенню.

Друга серія експериментів була проведена на макеті, що складається з одиночного випромінювача без концентратора. Для проведення експерименту макет акустичного блоку, з одного випромінювача занурювався в ванну з водою разом з тримачем. Туди ж занурювалась пляшка, на внутрішню поверхню якої були нанесені забруднення у вигляді плям солідолу, соняшникової олії, емульсійної фарби і клею "Дікстрін". Випромінювач підключався стенду і збуджувався гармонійним сигналом на резонансній частоті перетворювача $f = 16.7$ кГц. Напруга сигналу змінювалося в межах від 10 В до 100 В. При цьому акустична потужність, що знімається з поверхні, що випромінює, змінювалася від 0.01-0.03 до 1-2 ват з квадратного сантиметра. Експерименти показали, що при розміщенні випромінюючої поверхні паралельно до дна пляшки на відстані 10-12 мм, забруднення, які знаходяться на дні і біля нього на відстані 3-5 сантиметрів видалялися з поверхні протягом 0.5-1 хвилини при акустичній потужності, що знімається з випромінюючої поверхні близько 1-2 Вт з квадратного сантиметра. Підвищення напруги до 300 В не привело до істотних змін в процесі видалення забруднень.

При розміщенні випромінюючої поверхні паралельно циліндричній стінки пляшки на відстані 5-10 мм, забруднення, що знаходяться на зовнішній стороні пляшки на невеликій відстані від поверхні, що випромінює перетворювач, віддалилися протягом 0.5-1 хвилини при акустичній потужності, що знімається з поверхні випромінювача, порядку 1-2 ват з квадратного сантиметра. Причому, підвищення потужності (напруги) не привело до істотних змін в процесі видалення зовнішніх забруднень. Що ж стосується забруднень, що знаходяться на внутрішній стороні, то вони, при тих же умовах, видалялися повністю протягом 1-2 хвилин. Спостереження за процесом очищення під мікроскопом показали, що основний час при цьому витрачається на процес емульгування масел.

На підставі цих спостережень був зроблений висновок про те, що розміщення одиничного (плоского) перетворювача з боку дна пляшки може виявитися більш ефективним, ніж розміщення з боку стінки. Однак, такий виграш може виявитися ефективним лише за умови що вертикальний розмір кластера досягне вертикального габариту пляшки.

Відзначимо так само, що ефективне очищення слабо зв'язаних з поверхнею скла забруднень спостерігається при випромінюваній потужності порядку одного-двох ват на квадратний сантиметр випромінюваної поверхні, що не перевищує поріг нестационарної кавітації. Однак в експериментах з одиночним перетворювачем не вдалося отримати кластер, який займає весь внутрішній об'єм.

Третя серія експериментів була проведена на макеті фокусувального акустичного блоку (рис. 3). Ця конструкція дозволила створити кластер, габарити якого охоплюють весь предмет, що очищається.

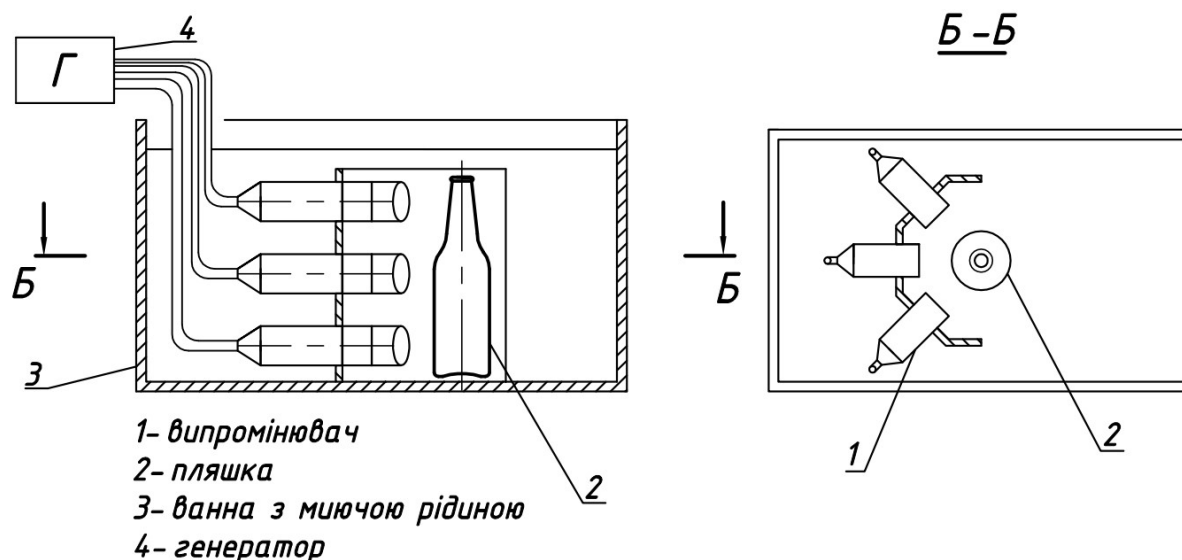


Рис. 3. Макет фокусувального акустичного блоку (з зануреними перетворювачами).

При проведенні експериментальних робіт, після отримання перших позитивних результатів з очищення, головним завданням було визначення прийнятних параметрів сигналу збудження блоку. Необхідно було визначити, за яких умов починається кавітація, як впливає виникнення кавітації на роботу перетворювачів; змінюються при цьому умови їх навантаження і яким чином можна було б оптимізувати умови роботи перетворювачів.

Для відповіді на ці питання були проведені вимірювання навантажувальних характеристик блоку при малій напрузі збудження, тобто в лінійному режимі. За результатами цих вимірів була визначена резонансна частота блоку. А потім, на знайдений таким чином резонансній частоті були виміряні залежності величини активної і реактивної складової опору навантаження групи перетворювачів в залежності від амплітуди сигналу збудження.

Вимірювання проводилися шляхом реєстрації показань вимірювальних приладів: вольтметр ВЗ-38 і В7-27, і фазометра Ф2-34 (рис. 2).

Результати вимірювань навантажувальних характеристик блоку, при напрузі збудження блоку $U = 10$ В, були оброблені. З таблиці видно, що в цьому діапазоні частот блок має три локальних мінімуму активної складової електричного опору змінному струмі (R_w). Перший мінімум на частоті близько 16.7 кГц, другий – 33.4

кГц, третій – 48.0 кГц. Перша з цих частот відповідає резонансній частоті блоку, а дві інші – першим і другим гармонікам резонансної частоти. Причому, найбільш яскраво виражені резонанс і його друга гармоніка. Мінімум на першій гармоніці виявляється слабше. Тут спостерігаються яскраво виражені мінімуми фази, які відповідають першій резонансній частоті і її другій гармоніці.

Далі, з метою визначення оптимальних значень напруги збудження блоку, на частоті першого резонансу $f=16.7$ кГц були проведені вимірювання залежності активної та реактивної складової електричного опору акустичного блоку в залежності від зміни напруги збудження блоку в діапазоні від 10 В до 300 В. Вимірювання проводилися таким же чином як і попередні, тобто шляхом реєстрації показань вимірювальних приладів: вольтметри В3-38 і В7-27, і фазометра Ф2-34 (див. рис. 2). Результати вимірювань навантажувальних характеристик блоку при збільшенні напруги збудження блоку були оброблені.

Результати обробки наведені в таблиці 1 (додатк 1), зображені залежності активної та реактивної складової електричного опору акустичного блоку в залежності від напруги в діапазоні від 10 В до 300 В. Одночасно з вимірами навантажувальних характеристик проводилися вимірювання напруги сигналу з виходу вимірювального гідрофону, розташованого в двох місцях: біля поверхні, що випромінює блоку на відстані від неї приблизно 2-3 міліметра і в фокальній зоні (тут слід зазначити, що сигнал на виході гідрофону прямо пропорційний тиску тільки при малих акустичних тисках; при перевищенні першого ж порога кавітації сигнал гідрофону можна використовувати тільки для спостережень і, можливо, якісної оцінки кавітаційної активності розчину миючої рідини).

Аналіз результатів вимірювань, показує, що при підвищенні напруги гармонійного сигналу збудження, активна складова опору навантаження фокусувального акустичної системи (блоку) веде себе таким чином: до настання порога стаціонарної кавітації, тобто до напруги близько 80 В, опір навантаження практично не змінюється (при сумарній площі випромінюючої поверхні 124.7 квадратних сантиметрів і електроакустичному коефіцієнті корисної дії 0.3 – напруга збудження 80 В відповідає випромінюваній акустичної потужності

приблизно 0.035 вата з квадратного сантиметри); причому, не спостерігаються зміни як активної (R_w), так і реактивної складової (X_w). Таке мале значення випромінюваної акустичної потужності, яке відповідає початку кавітації свідчить перш за все про те, що кавітаційний кластер зароджується тільки в фокальній зоні. При цьому поблизу поверхні перетворювача кавітація, ймовірно, відсутня, про що свідчить залежність напруги сигналу на виході вимірювального гідрофону від напруги збудження блоку.

При подальшому збільшенні напруги збудження R_w починає спадати, а X_w – відповідно зростати, що, ймовірно, свідчить про зростання розмірів пульсуючих бульбашок. Коли напруга збудження досягає 260 В опір R_w перестає спадати і починає зростати, а X_w , відповідно, – спадати. Такий характер залежності може свідчити або про досягнення порогу нестационарних (колапсуючої) кавітації в фокальній області, або про виникнення стаціонарної кавітації поблизу поверхні, що випромінює.

1) По-перше, – з даних таблиці 2 в легко вирахувати, що різка зміна характеру залежності зміни електричного опору від зростання напруги сигналу збудження, відбувається при випромінюванні акустичної потужності, що оцінюється значенням 0.6-0.7 Вата з квадратного сантиметра. З проведеного огляду літератури видно, що таке значення випромінюваної потужності приблизно відповідає порогу стаціонарної кавітації.

2) По-друге, слід зазначити, що при проведенні експериментів з одиночним перетворювачем стаціонарна кавітація, яка призводить до надійного очищення поверхні предметів від слабо пов'язаних з поверхнею забруднень, так само спостерігалася при випромінюванні потужності порядку одного-двох ват на квадратний сантиметр випромінюючої поверхні, що не перевищує поріг нестационарної кавітації.

3) По-третє, свідчення гідрофону, розташованого у випромінюючої поверхні, аж до напруги 150 В ростуть майже лінійно. А ось гідрофон, розташований в фокальній області, дає різкі відхилення від лінійного росту вихідної напруги починаючи з напруги збудження приблизно 70-80 В, що

явно свідчить про початок кавітації в фокальній зоні. Головка вимірювального гідрофону являє собою порожню п'єзокерамічну сферу діаметром 15 мм. Тому поблизу поверхні випромінювача, де повинні існувати великі градієнти тиску, показання гідрофону швидше за все залежать від розподілу акустичного тиску по його поверхні. При розташуванні гідрофону в фокусі акустичний тиск має діяти на чутливу голівку однаково з усіх сторін, але з досягненням порогу кавітації на ній починають впливати кавітуючими бульбашки і стрибкуватість кривої U_f можна пояснити тим, що сумарний тиск кавітаційних мікро ударів на поверхню можна порівняти з акустичним тиском звукового поля. І якби вплив кавітації на голівку гідрофону, розташованого поблизу поверхні випромінювачів, так само було порівняно з впливом акустичних коливань, то і крива U_p так само була б порізана. Дійсно, незначна нерівномірність спостерігається при напрузі близько 100 В.

Крім того, як було встановлено в експерименті з концентратором, виникнення кластера поблизу поверхні випромінювача може "замкнути" випромінювач, і, відповідно, "розвалити" поле.

Таким чином, є більше підстав вважати, що початок зростання R_w і зменшення X_w відповідає виникненню стаціонарної кавітації поблизу поверхні, що випромінює.

Також видно, що до настання порогу стаціонарної кавітації поблизу поверхні перетворювачів, споживана електрична потужність зростає приблизно за квадратичним законом. З виникненням пульсуючих бульбашок навантаження перетворювачів з акустичною боку змінюється таким чином, що перетворювачі не можуть спожити ще більшу потужність.

Звідси випливає, що більш високу акустичну потужність знімати з перетворювачів не має сенсу. Такий висновок підтверджується також тим, що кавітаційний Кластер, розташований поблизу поверхні, що випромінює повинен "замикати" випромінювання, тому для нормальної роботи фокусувальної акустичної системи (блоку) може бути рекомендований режим, що полягає в випромінюванні

потужності, при якій поблизу випромінюючої поверхні поріг стаціонарної кавітації ще не досягнутий, а в фокальній зоні – істотно перевищений. Для цього макета такий режим досягається при напрузі збудження 150 В, що відповідає акустичної потужності близько 0.5 Вт/см².

При роботі цього блоку кавітаційний кластер охоплює всю очищувальну пляшку, розташовану в фокальній зоні. Час очищення від згаданих вище забруднень становить 1-2 хвилини. Однак існують забруднення, які не вдається видалити навіть за 5-7 хв. Тому з вибором робочої напруги збудження оптимізація режиму роботи акустичного блоку не закінчилася.

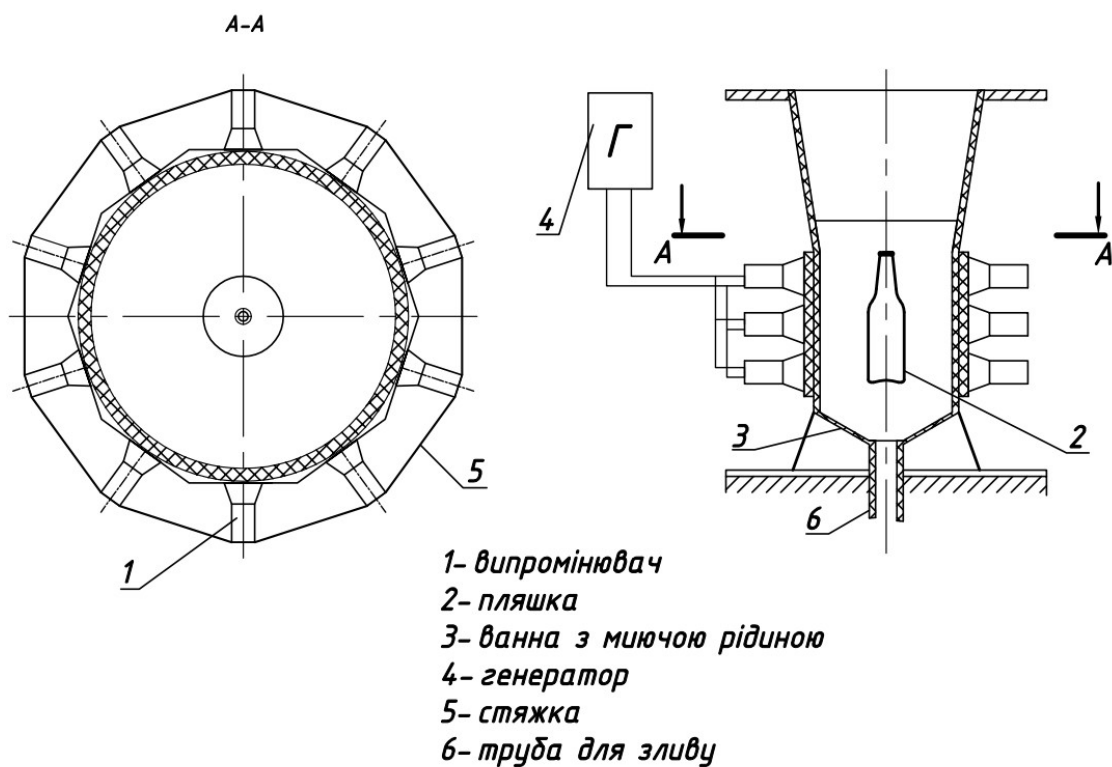


Рис. 4. Макет фокусувального акустичного блоку (з перетворювачами на стінках).

Четверта серія експериментів була проведена на макеті фокусувального акустичного блоку, конструкція якого представлена на рис. 4. Ця конструкція, так само як і конструкція фокусувального блоку з рис. 3, дозволила створити кластер,

габарити якого охоплюють весь очищувальний предмет. Її основна конструктивна відмінність полягає в тому, що наявність "звукопрозорої" оболонки між випромінюючою поверхнею перетворювача і миючою рідиною практично не допускає розвитку кавітації поблизу стінок ванни (випромінюючої поверхні перетворювача). Кавітація може існувати тільки в фокальній області за рахунок ефекту фокусування. Крім того, резонансна частота застосованих для цієї ванни перетворювачів становила 12 кГц. Остання обставина виключає можливість промислового застосування камери з міркувань ергономіки, оскільки при цій частоті присутність людей поблизу випромінювачів неприпустимо.

В цілому результати четвертої серії підтвердили правильність вибору підходу до задання режиму збудження акустичного блоку і принципову можливість виконання очищення за допомогою фокусуючих систем. А саме: знімаючи з поверхні перетворювачів фокусуючої системи невелику акустичну потужність порядку $0.5-1 \text{ Вт/см}^2$ можна отримати кавітаційний кластер, який перебуває в фокальній області. При цьому поблизу поверхні перетворювача кавітація не виникає, що, виключає можливість "замикання" випромінення кавітаційним кластером, а також, наприклад, дозволяє уникнути випадкових дотиків випромінювача до очищувальної скляної поверхні.

2.3.3. Експериментальна перевірка функціонування акустичних блоків

Експериментальна перевірка функціонування акустичних блоків проводилася з метою перевірки можливості досягнення кінцевого результату (очищення скляної пляшки від забруднень).

Метою цих експериментів так само була спроба провести підбір інших параметрів, що впливають на кавітаційну активність кластера. До підбору були віднесені: склад розчину миючої рідини і зовнішні чинники, такі як температура і вміст газу у миючому розчині.

Тут слід зазначити, що оптимізація активності кластера за такими параметрами розчину миючої рідини як густина, в'язкість і поверхневий натяг не

проводилась, оскільки розробка спочатку орієнтована на зменшення концентрації луку в застосовуваному миючому розчині не на зміну його складу. Застосування підвищеного гідростатичного тиску в діючій лінії так само виключається, оскільки для цього треба було б створення, фактично нової технологічної лінії та її відповідне техніко-економічне обґрунтування.

Результати експериментів першої серії з макетами пристроїв, на основі одного і семи випромінювачів з заповненими водою концентраторами виявився негативним. За допомогою заповненого водою концентратора неможливо створити кавітаційний кластер, що заповнює внутрішню порожнину пляшки. Причина цього явища полягає в тому, що кластер, що утворюється в горловині концентратора при невеликій акустичній потужності, що знімається з випромінюваної поверхні, ($0.05-0.2 \text{ Вт/см}^2$) створює екран, що складається з кавітуючих бульбашок. Цей екран не дозволяє акустичним коливанням проникати у внутрішню порожнину пляшки. І, отже, закладати таку конструкцію в основу технологічного вузла – недоцільно.

Результати експериментів другої серії з макетом, що складається з одиночного випромінювача без концентратора, так само не можна повністю віднести до позитивних. Для проведення експерименту макет акустичного блоку, що складається з одного випромінювача з тримачем занурювався у ванну з водою. Туди ж занурювалася пляшка, на внутрішню поверхню якої були нанесені забруднення у вигляді плям солідолу, соняшникової олії, водоемульсійної фарби і клею "Дікстрін". Випромінювач підключався до стенду і збуджувався гармонійним сигналом на резонансній частоті перетворювача рівній 16.7 кГц . Напруга сигналу змінювалася в межах від 10 В до 100 В . При цьому акустична потужність, що знімається з випромінюючої поверхні змінювалася від $0.01-0.03$ до $1-2$ ват з квадратного сантиметра. Експерименти показали, що при розміщенні випромінюючої поверхні паралельно до дна пляшки на відстані $10-12 \text{ мм}$, забруднення, що знаходяться на дні і біля нього на відстані $3-5$ сантиметрів, видаляють з поверхні протягом $0.5-1$ хвилини при акустичній потужності, що знімається з поверхні, що випромінює порядку $1-2 \text{ Ватт з квадратного сантиметра}$.

Підвищення напруги до 300 В не привело до істотних змін в процесі видалення забруднень.

При розміщенні випромінюючої поверхні паралельно циліндричній стінці пляшки на відстані 5-10мм, забруднення, що знаходяться на зовнішній стороні пляшки на невеликій відстані від випромінюючої поверхні перетворювача, віддалялися, протягом 0.5-1 хвилини при акустичній потужності, що знімається поверхні випромінювача, порядку 1-2 ват з квадратного сантиметра. Причому, підвищення потужності (напруги) не привело до істотних змін в процесі видалення зовнішніх забруднень. Що ж стосується забруднень, що знаходяться на внутрішній стороні, то вони, при тих же умовах, віддалялися повністю на протязі 1-2 хвилин.

Візуальні спостереження за процесами очищення під мікроскопом показали, що основний час при цьому витрачається на процес емульгування масел. Видалення, наприклад, сухих залишків харчових продуктів, що піддаються відшарування і струменевого очищення (на підставі інформації з розділу 1), відбувається за декілька десятків секунд.

З метою підвищення кавітаційної активності створюваного кластера використовувалася вода, підігріта до приблизно п'ятдесяти градусів Цельсія. Крім того, в ванну додавалася каустична (харчова) сода з розрахунку 1 грам на літр розчину миючої рідини. Візуальні спостереження за процесом очищення показали, що істотних змін в швидкості процесу очищення не відбувається. Так, якщо при температурі 20-25 градусів Цельсія без добавки соди, рослинні і тваринні жири видалялись з очищувальних поверхонь за час близько двох хвилин, то з зазначеними добавками при підвищенні температури до п'ятдесяти градусів Цельсія, очищення відбувалася трохи швидше (приблизно в два рази).

На підставі цих спостережень був зроблений висновок про те, що розміщення одиночного (плоского) перетворювача з боку дна пляшки може виявитися більш ефективним, ніж розміщення з боку стінки. Однак, такий виграш може виявитися корисним лише за умови, що вертикальний розмір кластера досягне вертикального габариту пляшки. Для того, що б домогтися збільшення розмірів кластера,

необхідно нарощувати кількість перетворювачів і розташовувати їх не тільки в області дна, а й по висоті очищувального предмета.

В цілому, можна вважати, що експеримент підтвердив можливість використання перетворювачів, розташованих як на дні, так і в стінках ванни. Такий висновок не є новим, оскільки ванни з боковим і донним розташуванням перетворювачів широко застосовуються в різних галузях промисловості.

"Квазі-імпульсний" режим – цей режим застосовувався також при проведених експериментів. Для його створення на вхід попереднього підсилювача (див. Рис 2) через лінійний змішувач подавалися гармонійні сигнали від двох (або трьох) задаючих генераторів ГЗ-110. При цьому на виході змішувача виходив гармонійний сигнал, з биттям на частоті, що дорівнює різниці частот задаючих генераторів. Такий прийом дозволяє не включати до складу стенду спеціальний хронізатор-модулятор імпульсних сигналів, і, тим самим, спрощує процедуру управління режимом збудження.

Третя серія експериментів була проведена з макетом фокусувальної акустичної системи, представленого на рис. 3. Очищувальний предмет розміщувався в одній з фокальних зон. Таких зон було виявлено, принаймні три. Одна з них відповідає геометричному місцю перетину осей перетворювачів (фокусу), а дві інші знаходяться поблизу крайніх вертикальних рядів перетворювачів на відстані 2-3 сантиметри від краю блоку.

При акустичній потужності, що знімається з поверхні випромінювачів, порядку пів вата з квадратного сантиметра кавітаційний кластер охоплює всю очищувальну пляшку, розташовану в фокальній зоні. Час очищення як зовнішньої, так і внутрішньої поверхні скла від сухих залишків харчових продуктів шляхом їх відшарування, становило від 15 до 30 секунд. Крім того, при розміщенні заповненої водою пляшки в фокальну зону був зафіксований резонанс системи "скло-рідина", при якому з шийки пляшки "б'є" акустичний фонтан з крапельок рідини. У такому резонансному режимі забруднення відшаровуються не більше ніж за 5-10 секунд. Однак застосування цього резонансу, ймовірно, недоцільно, оскільки може привести до передчасного руйнування скла. Відзначимо так само, що час

відшарування забруднень з внутрішньої сторони скла для такого резонансу, практично не відрізнялося від часу відшарування із зовнішнього боку.

Візуальні спостереження під мікроскопом за процесами емульгування масел показали, що час, що витрачається на цей процес залежить від виду забруднення і в окремих випадках може досягати 5-7 хвилин. Існують так само забруднення, наприклад масляні фарби, які не вдається видалити навіть за істотно більші проміжки часу.

Що ж стосується процесу струминного очищення, то мікроскоп не дозволить однозначно стверджувати можливість спостереження цього процесу.

Для прискорення процесу емульгування була зроблена спроба підвищення кавітаційної активності кластера шляхом використання миючого розчину, підігрітого до температури близько п'ятдесяти градусів Цельсія. Крім того, в підігріту воду додавалася каустична (харчова) сода з розрахунку 1 грам на літр розчину миючих рідин. Візуальні спостереження за процесом очищення показали, що істотних змін в швидкості процесу емульгування не відбувається. Так, якщо при температурі 20-25 градусів Цельсія без добавки соди, рослинні і тваринні жири віддалялися з очищувальних поверхонь за час порядку однієї-двох хвилин, то в новому розчині температури до п'ятдесяти градусів Цельсія, видалення з поверхні відбувалося приблизно в два рази швидше, тобто за час порядку однієї хвилини. Причому, на емульгування різних видів масла витрачався різний час.

Режим збудження був обраний таким же, як і в третій серії. Тобто випромінювання квазі-імпульсного сигналу резонансної частоти при акустичній потужності, що знімається з поверхні перетворювачів порядку $0.5-1 \text{ Вт/см}^2$. Частота биття 10-20 Гц. Збільшення кавітаційної активності – за рахунок підвищення температури розчину миючої рідини до температур близько 50 градусів Цельсія, а так само за рахунок добавки каустичної (харчової) соди з розрахунку приблизно 1 грам на літр розчину.

При цих умовах час, що витрачається на емульгування масел, виявився приблизно в півтора рази менше, ніж в аналогічних експериментах третьої серії. При цьому, як і в третій серії, було відзначено, що основний час витрачається на

процес емульгування масел. Таким чином, результати четвертої серії повністю підтвердили висновки, зроблені за результатами третьої серії експериментів.

2.4. Висновки до другого розділу

В цілому, за результатами всіх експериментів можна зробити висновок, що акустичне видалення забруднень з поверхні скляного посуду можливо і доцільно. Максимальних витрат часу вимагає процес акустичного емульгування масел, і, в зв'язку з цим, при промисловому впровадженні технології слід особливу увагу приділити підбору хімічного складу миючих рідин.

ВИСНОВКИ

В результаті проведених робіт, обґрунтована можливість створення акустичної технології миття і очищення скляного посуду багаторазового використання. Впровадження акустичних технологій в харчовій промисловості може дозволити істотно скоротити витрату миючих хімічних речовин, що в свою чергу має призвести до поліпшення екологічної обстановки. Крім того, час, що витрачається на обробку скляного посуду багаторазового використання, повинно помітно скоротитися.

Підставою для такого висновку є результати проведення досліджень:

- Виконані огляди науково-технічної літератури показали, що явище кавітації широко використовується промислових технологій мийки та очищення різних предметів. Однак інформація по спеціальних приладах, які призначені для очищення скляного посуду багаторазового використання не знайдено.
- Експериментальні дослідження, виконані на спеціальних макетах акустичних блоків, показали, що акустичне видалення забруднень з поверхні скляного посуду можливо і доцільно.

Кавітаційний кластер можна отримати поблизу випромінюючої поверхні перетворювача. Однак в цьому випадку необхідні такі габарити і просторова конфігурація випромінювача, які дозволили б проводити потік пляшок на відстані декількох сантиметрів від випромінюючої поверхні. Більш економічним по витратам електроенергії і терміном експлуатації є конструктивне рішення з застосуванням фокусувальних акустичних систем. Фокусувальний блок, працюючий в до кавітаційному режимі (тобто при випромінюванні потужності порядку 0.5-1 Ват на сантиметр квадратний), дозволяє створити кілька великогабаритних кластерів, що знаходяться на відстані від випромінюючої поверхні.

У кластері зі стаціонарною кавітацією, швидше за все видаляються забруднення, які піддаються кавітаційному відшаруванню. Такі забруднення видаляються за кілька десятків секунд. Великих витрат часу вимагають процеси

акустичного емульгування масел і масляних плівок. З цієї причини, при промисловому впровадженні акустичної технології слід особливу увагу приділити підбору емульгаторів. Збільшенню кавітаційної активності та підвищення температури розчину миючих рідин до $50^{\circ}\text{--}60^{\circ}\text{ C}$, що сприяє підвищенню швидкості очищення.

Ефективність процесу очищення в цілому визначається загальним вмістом енергії кластера, який залежить від акустичної енергії, температури, хімічного складу миючої рідини).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Исследование эрозионной активности акустической кавитации в органических растворителях / Б. А. Агранат [и др.] // Акустический журнал. – 1982. – XXIX, № 5. – С. 577–579.
2. Ультразвук : Маленькая энциклопедия. – Москва : Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
3. Аваранат Б. А. Ультразвуковая очистка / Б. А. Аваранат, В. И. Башкиров, Ю. И. Китайгородский // Физика и техника мощного ультразвука / ред. Л. Д. Розенберг. – Москва, 1970. – Т. 3 : Физические основы ультразвуковой технологии. – С. 165–252.
4. Флинн Г. Физика акустической кавитации в жидкости / Г. Флинн // Физическая акустика. – Москва, 1967. – Т. 1. – С. 7–138.
5. Кнэпп Р. Кавитация / Р. Кнэпп, Д. Дейли, Ф. Хэммит. – Москва : Мир, 1974. – 686 с.
6. Келлер К.О., Кратыш С.Г., Лубяницкий Г.Д. Ультразвуковая очистка. Ленинград: "Машиностроение", 1977.
7. Панов А. П. Ультразвуковая очистка прецизионных деталей / А. П. Панов. – Москва : Машиностроение, 1984. – 88 с.
8. Брантон Л.Х. Неустановившиеся течения с большими скоростями. Москва : Наука, 1973. – 139 с.
9. Заболотская Е. А., "Взаимодействие газовых пузырьков в поле звуковой волны," // Акустический журнал, Т. XXX, № 5, 1984. С. 618-623.
10. Двойников А. А. Учет сжимаемости жидкости в задаче о взаимодействии газовых пузырьков в поле звуковой волны / А. А. Двойников, С. Г. Завтрак // Акустический журнал. – 1984. – XXXIV, № 2. – С. 246–250.
11. Красильников В. А. Введение в физическую акустику / В. А. Красильников, В. В. Крылов. – Москва : Наука, 1984. – 403 с.
12. Акуличев В. А. Пульсации кавитационных полостей / В. А. Акуличев // Физика и техника мощного ультразвука / ред. Л. Д. Розенберга. – Москва, 1968. – Т. 2 : Мощные ультразвуковые поля. – С. 129–166.
13. Монахов В.Н., Пешковский С.Л., Попович А.С., Фомичев Б.И., Чиняков И.П., Яковлев А.Д., "К вопросу о втором пороге ультразвуковой кавитации в воде," // Акустический журнал, Т. XXI, № 3, 1975. С. 432-435.
14. Сиротюк М. Г. Экспериментальные исследования ультразвуковых кавитаций / М. Г. Сиротюк // Физика и техника мощного ультразвука / ред. Л. Д. Розенберг. – Москва, 1978. – Т. 2 : Мощные ультразвуковые поля. – С. 167–220.

Таблиця 1.

	f, [Гц]	I, [мА]	f _i , [гр]	R _w , [Ом]	X[Ом]
1	9.00	39.5	91.7	8533.78	253.281
2	9.50	42.0	91.6	8527.28	238.19
3	10.00	44.0	91.3	10017.59	227.33
4	10.50	48.0	88.4	7461.36	208.41
5	11.00	52.0	88.6	7871.07	192.37
6	11.50	55.0	87.6	4341.35	181.98
7	12.00	57.5	86.4	2769.73	174.26
8	12.50	61.0	85.7	2186.41	164.40
9	13.00	64.0	84.6	1660.32	156.95
10	13.50	68.0	81.2	961.26	148.81
11	14.00	75.0	33.6	1195.15	134.17
12	14.25	79.0	78.3	624.21	129.27
13	14.50	78.0	76.7	557.29	131.74
14	14.75	81.0	79.6	683.90	125.52
15	15.00	90.0	75.3	437.86	114.87
16	15.10	93.0	71.4	337.12	113.45
17	15.20	89.0	68.7	309.32	120.60
18	15.30	89.5	69.3	316.10	119.44
19	15.40	94.0	67.0	272.27	115.57
20	15.50	96.0	63.8	235.93	116.09
21	15.60	93.0	60.9	221.10	123.06
22	15.70	95.0	57.6	196.45	124.67
23	15.80	89.0	55.3	197.37	136.67
24	15.90	86.5	56.2	207.82	139.12
25	16.00	86.0	55.7	206.34	140.76
26	16.10	86.0	54.3	199.26	143.19
27	16.20	85.0	50.3	184.18	152.91
28	16.30	81.0	49.7	190.88	161.87
29	16.40	79.0	49.7	195.71	165.97
30	16.50	78.5	52.4	208.78	160.79
31	16.60	83.0	47.5	178.34	163.41
32	16.70	78.5	42.1	171.69	190.01
33	16.80	72.0	41.0	184.03	211.70
34	16.90	68.5	43.8	202.26	210.92
35	17.00	68.5	41.8	195.83	219.02

36	17.10	67.0	40.0	194.84	232.20
37	17.20	65.0	37.6	194.18	252.15
38	17.30	55.0	31.2	212.56	350.98
39	17.40	46.0	34.9	265.06	379.96
40	17.50	42.0	44.0	330.99	342.75
41	17.60	43.5	49.0	350.40	304.60
42	17.70	42.0	49.8	368.38	311.73
43	17.80	40.0	54.9	434.78	305.57
44	17.90	42.5	59.0	456.85	274.50
45	18.00	42.5	56.4	425.9	282.49
46	18.10	40.0	58.9	484.00	291.96
47	18.20	39.0	62.8	560.95	288.29
48	18.40	40.5	72.8	834.99	258.47
49	18.60	46.5	73.5	757.19	224.29
50	18.80	43.0	71.8	744.58	244.81
51	19.00	44.0	78.3	1120.74	232.10
52	19.25	45.0	79.7	1242.84	225.86
53	19.50	46.0	82.3	1622.49	219.37
54	19.75	49.0	86.9	3773.78	204.38
55	20.00	50.0	87.5	4585.12	200.19
56	20.10	53.0	87.0	3605.15	188.94
57	20.50	58.0	89.0	9879.08	172.44
58	21.00	60.0	91.0	9549.79	166.69
59	21.50	64.0	91.5	5969.00	156.30
60	22.00	67.0	92.2	3888.06	149.36
61	22.50	70.0	92.2	3721.4	142.96
62	23.00	73.0	92.8	2804.23	137.15
63	23.50	74.5	92.6	2958.98	134.37
64	24.00	77.0	93.5	2127.33	130.11
65	25.00	82.5	93.6	1930.42	121.45
66	26.00	87.0	94.0	1647.77	115.22
67	27.00	91.0	94.6	1370.22	110.25
68	28.00	97.0	94.9	1206.94	103.47
69	29.00	102.0	94.8	1171.63	98.38
70	30.00	105.0	95.2	1050.82	95.63
71	31.00	110.0	95.5	948.49	91.33
72	32.00	114.0	95.6	898.92	88.14
73	33.00	118.0	95.8	838.60	85.18
74	34.00	125.0	95.8	791.64	80.41
75	35.00	132.0	95.5	790.41	76.11
76	36.00	137.0	95.0	837.50	73.27

77	38.00	144.0	93.5	1137.53	69.57
78	40.00	152.0	93.9	967.27	65.94
79	42.00	166.0	93.4	1015.76	60.35
80	44.00	185.0	90.6	5161.90	54.06
81	45.00	188.0	89.0	3047.80	53.20
82	46.00	207.0	86.0	692.54	48.43
83	46.50	212.0	81.2	308.33	47.73
84	46.75	208.0	78.2	235.10	49.11
85	47.00	201.0	77.1	222.85	51.04
86	47.25	200.0	77.4	229.21	51.23
87	47.50	200.0	75.8	203.83	51.58
88	47.75	187.0	75.8	218.00	55.16
89	48.00	181.0	75.3	217.72	57.12
90	48.25	175.0	74.8	217.95	59.21
91	48.50	166.0	75.3	236.61	62.29
92	48.75	153.0	78.7	333.56	66.65
93	49.00	152.0	82.3	491.02	66.39
94	49.25	154.0	84.6	690.00	65.22
95	49.50	152.0	86.2	992.69	65.93
96	49.75	155.0	88.4	2310.62	64.54
97	50.00	158.0	89.4	6043.98	63.29

Напруга збудження $U = 10 \text{ В}$

Таблиця 2.

	U, [В]	I, [мА]	f _i , [Гц]	R _w , [Ом]	X, [Ом]	P, [Па]	U _{gfF}	U _{gfP}
1	10.0	69	49.5	223	190	0.2	24	203
2	12.0	82	49.5	225	192	0.3	29	243
3	14.0	96	49.5	224	191	0.4	34	282
4	16.0	110	49.4	223	191	0.5	39	333
5	18.0	123	49.3	224	193	0.7	46	375
6	20.0	138	49.2	221	191	0.9	51	412
7	22.0	152	49.2	221	191	1.0	54	452
8	24.0	165	49.2	222	192	1.2	57	492
9	26.0	176	49.3	226	195	1.4	60	532
10	28.0	192	49.3	223	192	1.7	67	572
11	30.0	205	49.2	223	193	2.0	70	612
12	32.0	218	49.3	225	193	2.2	73	645
13	34.0	232	49.3	224	193	2.5	78	695
14	36.0	245	49.4	225	193	2.8	82	728
15	38.0	255	49.3	228	196	3.1	85	765
16	40.0	270	49.3	227	195	3.5	87	805
17	42.0	280	49.3	229	198	3.8	89	847
18	44.0	295	49.2	228	197	4.2	96	890
19	46.0	310	49.2	227	105	4.6	99	930
20	48.0	325	49.2	226	195	5.1	98	950
21	50.0	335	49.2	228	197	5.4	100	1030
22	52.0	350	49.2	227	196	5.9	100	1070
23	54.0	362	49.1	227	197	6.41	105	1120
24	56.0	375	49.0	227	197	6.8	112	1160
26	58.0	390	48.8	225	197	7.4	110	1200
26	60.0	405	48.6	224	197	8.0	102	1240
27	62.0	420	48.6	223	196	8.6	105	1280
28	64.0	430	48.4	224	198	9.1	110	1320
29	66.0	440	48.3	225	200	9.6	112	1360
30	68.0	455	48.3	224	200	10.21	117	1410
31	70.0	470	48.3	223	199	10.91	120	1450
32	75.0	500	47.9	223	202	12.51	115	1530
33	80.0	535	47.6	221	202	14.4	115	1650
34	85.0	565	47.5	222	203	16.21	117	1730
35	90.0	605	47.3	219	202	18.4	135	1850
36	95.0	655	46.8	211	198	21.3	170	1950
37	100	710	45.0	199	199	25.1	260	2070
33	110.0	800	43.8	190	198	31.7	260	2150
39	120.0	870	44.3	192	197	37.3	260	2520

40	130.0	910	41.7	191	214	44.1	300	2620
41	140.0	1020	40.2	179	212	54.5	540	2900
42	150.0	1080	39.8	180	216	62.2	620	3200
43	160.0	1150	38.0	176	225	72.5	550	3200
44	170.0	1270	36.0	165	227	87.3	500	3350
45	180.0	1350	35.0	162	232	99.5	500	3000
46	190.0	1420	34.0	161	239	111.8	620	3000
47	200.0	1500	33.8	160	239	124.6	700	3000
48	210.0	1580	32.5	157	247	139.9	600	3000
49	220.0	1640	33.3	160	244	150.7	650	3000
50	230.0	1740	28.0	149	281	176.6	650	3000
51	240.0	1880	26.5	142	286	201.9	750	3000
52	250.0	2020	24.2	135	30'	230.3	650	3000
53	260.0	2070	22.8	136	324	248.0	650	3000
54	270.0	2080	21.5	139	354	261.2	850	3000
55	280.0	2050	24.3	149	331	261.5	850	3000
56	290.0	2050	24.3	155	343	270.9	900	3000
57	300.0	2000	30.0	173	300	259.8	900	3000
58	310.0	2000	33.0	184	284	259.9	1000	3000

UgfF – гідрофон у фокусі.

UgfP – гідрофон у поверхні перетворювача.

Чутливість гідрофона – 20 мкВ/Па.