

## **ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА ЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ**

### **Вступ**

Підвищення конкурентоспроможності підприємств, які займаються виробництвом продукції з вовни, неможливе без зниження собівартості волокнистих матеріалів і покращення їх якості, що вимагає докорінного підвищення технічного і технологічного рівня фабрики для обробки волокнистих матеріалів водними розчинами [1]. Метою обробки волокнистих матеріалів водними розчинами є видалення з них ґрунтових і гнойових забруднень, рослинних домішок і жиropоту з максимальним збереженням природних властивостей волокна для текстильної промисловості [2].

Отримання якісної сировини для текстильної промисловості з волокнистих матеріалів можливе на основі застосування звукових коливань для їх промивання [3].

У перспективній звуковій технології для промивання волокнистих матеріалів водними розчинами звукові коливання діють на систему «волокна – мийний розчин». Система «волокна – мийний розчин» знаходиться між решітками транспортера. У цій системі ключова роль для промивання волокнистих матеріалів відводиться гідродинамічному випромінювачу (ГДВ) звукових коливань. Конструкція ГДВ повинна забезпечити інтенсивність спрямованого звукового поля і швидкість спрямованих потоків мийного розчину [4].

Застосування гідродинамічного випромінювача звукових коливань для промивання волокнистих матеріалів дозволить розробити нову технологію. Нова технологія буде відрізнятися від традиційних значним зменшенням споживання енергоресурсів і води, підвищенням якості промивки волокнистих матеріалів.

Створення цієї технології неможливе без теоретичних та експериментальних робіт з визначення фізичних та геометричних параметрів гідродинамічного випромінювача звукових коливань низької частоти.

### **Аналіз літературних даних і постановка проблеми**

В роботі [5] для мийки волокнистих матеріалів розглядався ГДВ, в якому акустичні коливання створювалися за рахунок механічної енергії потоку рідини. Рідина подавалася на елементи у вигляді пластин з консольним кріпленням, які резонують.

Такі випромінювачі працюють при відносно низькому тиску 0,4 – 0,5 МПа, їх недоліком є швидкий вихід з елементів, що резонують, в результаті дії динамічних навантажень.

Для інтенсифікації замочування вовни в звичайній мийній барці було розроблено ГДВ [6]. У цьому ГДВ акустичне поле створювалося за рахунок пульсацій кавітаційної області між соплом і відбивачем. Частотний діапазон одержуваного випромінювання знаходиться в інтервалі 4 – 40 кГц. Максимум звукового тиску в ближній зоні випромінювача досягається при швидкості витікання струменя не менше 20 м/с. Недоліком ГДВ є низький ККД випромінювання 3 – 4 % і видалення великої кількості жиру при замочуванні, особливо волокнистого матеріалу, а також збільшення обсягу стічних вод.

В роботі [7] розглянуто ГДВ циліндричного типу. ГДВ складається з труби, яка переходить в кільцеве сопло, віддзеркаленої пластини і резонансного коливального пристрою – полого циліндра. Циліндр має бічні стінки з різьбовими отворами для укрупчування з одного боку труби з соплом, а з іншого боку – віддзеркалені пластини. У стінках порожнього циліндра симетрично розташовані 16 прорізів шириною 1,5 мм. Дана конструкція забезпечує круговий розподіл звукового випромінювання частотою 4 – 8 кГц і інтенсивністю до 1 Вт/см<sup>2</sup>.

Для створення звукових коливань був розглянутий ГДВ в роботі [8]. Розглянутий пристрій складається з корпусу прямокутного перерізу, стінки якого створюють наскрізний канал. В середині каналу встановлено модулятор, виконаний у вигляді *T*-подібного профілю, ширина якого дорівнює ширині корпусу. Загострена частина модулятора спрямована проти потоку, а розширена частина виконана під кутом 90° до центральної осі. Ось закріплена на двох протилежних стінках корпусу. Модулятор має можливість обертатися відносно осі до упору в обидві сторони. На двох стінках корпусу, перпендикулярних до напрямку коливального руху модулятора, виконано звуження у вигляді сопла Лавалю. Недоліком цього пристрою є те, що він не дозволяє отримувати стійкі звукові коливання в рідині в умовах змінних характеристик газорідного потоку.

У прямоточному ГДВ [9] з кільцевим соплом і східчастою перешкодою струмінь, що впливає з кругового щілинного сопла, формує пружну рідинну оболонку, яка жорстко затиснена на виході з сопла, причому інша її основа є вільною. Ступенева перешкода сприяє тому, що частина кінетичної енергії струменя витрачається на формування первинного вихору, всередині якого, за рахунок ефекту Бернуллі, створюються умови для розвитку кавітації. Нестійкість цього тороїдального вихору збуджує коливання струменевої оболонки на власній частоті. При розтягуванні оболонки вміст вихору виходить назовні і за рахунок ефекту Кармана утворюється вторинний тороїдальний вихор, що генерує тональний звук в результаті синфазного удару парових каверн. Недоліком пристрою є те, що частина потоку струменя йде в навколишній простір і в автоколиваннях не бере участь.

В роботі [10] описано застосування резонаторних ГДВ звукових коливань в хутряній промисловості. Одним з основних процесів в хутряній промисловості є процес знежирення і видалення забруднень з волосяного покриву шкір (овчина та ін.). В резонаторі ГДВ виникнення звукової хвилі відбувається при збігу частот коливань потоку рідини і кільцевих камер, внаслідок чого настає резонанс. Резонансні ГДВ здатні випромінювати звукові коливання в частотному діапазоні від 0,3 до 35 кГц з інтенсивністю 1,5–10 Вт/см<sup>2</sup>. Загальними перевагами ГДВ є дешевизна одержуваної звукової енергії, простота конструкцій та експлуатації. Перевагою пластинчастих гідродинамічних випромінювачів є те, що вони можуть працювати при відносно низьких напорах, починаючи приблизно з 2 атм.; недоліком є часті поломки пластин через втомні напруги, труднощі з точним розташуванням опор в вузлових точках, труднощі при генеруванні коливань в вузьких середовищах. Недоліком стрижневих гідродинамічних випромінювачів є те, що вони працюють при підвищених напорах, починаючи приблизно з 4 атм. [11].

Звукові коливання багатострижневий ГДВ використовує для очищення текстильних тканин [12]. Багатострижневий ГДВ складається з кільцевого сопла, віддзеркаленої пластини і резонансного коливального пристрою – полого циліндра. Оскільки звуковий опір м'якого розчину і текстильної тканини значно відрізняються, то перехід звукової енергії з розчину в тканину супроводжується значними втратами на відбиття і поглинання. Для очищення тканин застосовуються ГДВ на частотах 450 – 800 кГц.

Проведений аналіз літературних джерел показує, що технології, які застосовуються з акустичними пристроями для промивання волокнистої речовини (вовна та ін.), мають суттєві недоліки:

- спостерігається зволочування волокон, що при розчісуванні приводить до підвищення розривів волокон до 39 % та скорочення їх довжини в середньому на 4 – 10 %;
- в процесі промивки вовни руйнуються природні пружні властивості волокон;
- недостатнє видалення куль жиру в процесі мийки вовни надає волокнам жовтий колір;
- спостерігаються втрати волокон (до 30 %) в процесі мийки вовни;
- води виробництв, де промивають вовну, негативно впливають на живі організми в водоймищах на відстані декілька кілометрів від міста зливу;

- величезна кількість важкоочищуваних стічних вод (до 40 м<sup>3</sup>/т), а також шкідливий і екологічно небезпечний жирослизький осад;
- при випарюванні води і спалюванні осаду в атмосферу викидаються шкідливі речовини, у тому числі і сильна отрута – діоксин. Ці викиди забруднюють все навколишнє середовище – ґрунт, повітря, воду;
- мийна рідина, стічні води і жирослизький осад без спеціального знезараження є потенційним джерелом інфекційних захворювань, оскільки в них наявні патогенні мікроорганізми.

Необхідна якість промивання волокнистих матеріалів може бути забезпечена, якщо волокна в мийному розчині знаходяться між решітками транспортера. Для такої системи необхідно розробити нове джерело акустичних коливань, що збуджуються гідродинамічним перетворювачем у вигляді періодичних решіток в одній площині.

Основними перевагами промивання волокнистих матеріалів за допомогою акустичних коливань, що створюються гідродинамічним решітчастим перетворювачем, є: підвищення якості, білизни і м'якості волокон; скорочення часу миття волокон; зменшення витрат миючих речовин; миття волокон може здійснюватися при відносно низьких температурах (40 – 50°C); можливість автоматизації процесу промивання волокон; зменшення металоемкості устаткування; скорочення виробничих площ; значне зниження споживання води у зв'язку з багатократним її використанням в замкнутому циклі; виключення негативного впливу процесу промивання волокон на довкілля; проведення дезінфекції промивних вод і вовни без спеціальних засобів.

Огляд літератури [5 – 12] показує, що в даний час відсутня достатня кількість теоретичних і експериментальних робіт з визначення фізичних і геометричних параметрів акустичних коливань, збуджуваних гідродинамічним перетворювачем у вигляді періодичної решітки в одній площині для обробки волокнистих матеріалів водними розчинами. Тому актуальним є проведення теоретичних і експериментальних досліджень з визначення фізичних і геометричних параметрів ГДВ у вигляді періодичної решітки в одній площині.

### **Мета і завдання дослідження**

Метою досліджень є створення ГДВ у вигляді періодичної решітки в одній площині для промивання волокнистих матеріалів водним розчином.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести теоретичний аналіз з визначення конструктивних параметрів ГДВ у вигляді періодичної решітки в одній площині;
- на підставі багатofакторного експерименту уточнити конструктивні параметри ГДВ і параметри звукових коливань.

### **Теоретичний аналіз з визначення конструктивних параметрів гідродинамічного випромінювача звукових коливань**

Для теоретичного визначення конструктивних параметрів ГДВ звукових коливань розглядається модель періодичної решітки, яка утворена кінцевим числом пружних стрижнів прямокутного поперечного перерізу в нижній частині випромінювача (рис. 1).

Решітка може здійснювати тільки гармонійні пружні коливання, що залежать від однієї просторової змінної вздовж осі стрижня (тобто розглядається одномірна модель коливань).

Розрахунок фізичних і геометричних параметрів такого типу ГДВ проводиться в три етапи. На першому етапі розглядаються гармонійні вигинаючі коливання одиночного стрижня з жорстко закріпленими кінцями. На другому етапі досліджується задача про взаємодію звукового поля з решітками стрижнів.

При цьому природно припустити, що система стрижнів може бути замінена нескінченного періодичного системою. На третьому етапі досліджується задача про взаємодію звукового поля, яке порушується решітками пружних стрижнів, з шаром волокнистих матеріалів.

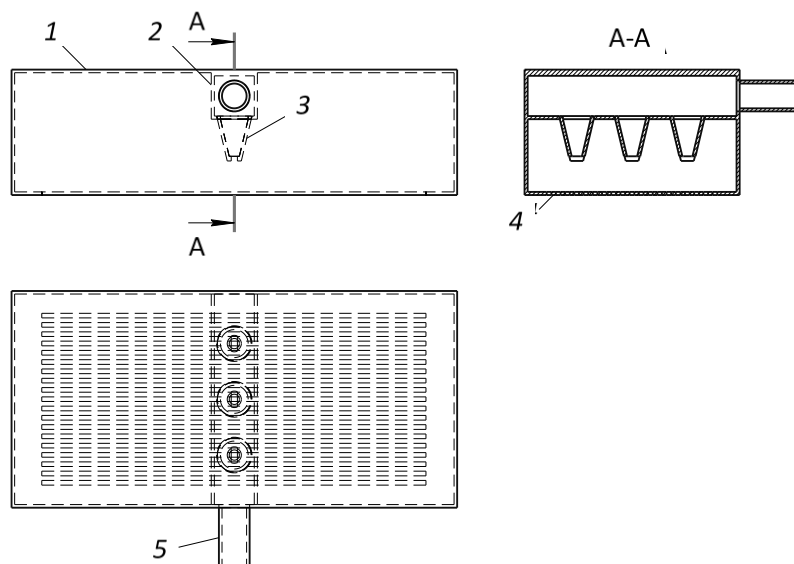


Рис. 1. Конструкція гідродинамічного випромінювача ГДВ у вигляді періодичної решітки в одній площині: 1 – корпус прямокутного перетину; 2 – квадратна труба; 3 – насадки що сходяться; 4 – стрижні; 5 – патрубок

Для вирішення завдання першого етапу скористаємося підходом, викладеним в [13].

Розглянемо постановку задачі про гармонійні вигинання власних коливань пружного стрижня прямокутного перерізу довжиною  $l$  ( $0 \leq x \leq l$ ), висотою  $h$  ( $-h/2 \leq z \leq h/2$ ) і шириною  $b$  ( $-b/2 \leq y \leq b/2$ ).

Припустимо, що деформації замалі (лінійне наближення), а довжина вісі стрижня при цих деформаціях не змінюється. Нехай функція  $U(x, t)$  описує зміщення стрижня вздовж осі  $x$  при вигибних вільних коливаннях (зовнішні сили на боковій поверхні стрижня відсутні). Тоді, відповідно [13], ця функція задовольняє рівнянню

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \bar{a}^2 \frac{\partial^4 U}{\partial x^4} = 0, \quad (1)$$

де  $\bar{a}^2 = \frac{EI}{\rho_c S}$ ;  $E$  – модуль пружності матеріалу стрижня;  $\rho_c$  – щільність матеріалу стрижня;

$S = b \cdot h$  – площа поперечного перетину стрижня;  $I$  – момент інерції поперечного перетину, який розраховується за формулою

$$I = \frac{bh^3}{12}.$$

Функція  $U(x, t)$  на торцях стрижня ( $x = 0, l$ ) повинна задовольняти граничним умовам (умови жорсткого защемлення):

$$U \Big|_{x=0,l} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0,l} = 0. \quad (2)$$

Таким чином, задача про гармонійні власні коливання пружного стрижня полягає в знаходженні рівняння (1), що відповідає граничним умовам (2).

Загальне рівняння (1), яке гармонійно залежить від часової змінної  $t$ , має вигляд [13]:

$$U(x, t) = e^{-i\omega t} \bar{U}(x, \omega), \quad (3)$$

$$\bar{U}(x, \omega) = A \operatorname{ch} \mu x + B \operatorname{sh} \mu x + C \cos \mu x + D \sin \mu x,$$

де  $\mu = \left( \omega / \bar{a}^2 \right)^{1/2}$ ;  $\omega$  – власна кругова частота вигибних коливань стрижня;  $A, B, C, D$  – довільні сталі величини.

Для знаходження власних частот  $\omega$ , підставимо (3) в граничні умови (2). В результаті отримаємо трансцендентне рівняння для розрахунку власних частот:

$$1 - \operatorname{ch}(\bar{\mu}) \cos(\bar{\mu}) = 0. \quad (4)$$

Тут  $\bar{\mu} = \mu l$ ,  $l$  – довжина стрижня вздовж його осі.

Нехай  $\bar{\mu}_n$ ,  $n = 1, 2, \dots$  корені рівняння (4). Тоді при великих значеннях індексу  $n \geq 3$  справедлива наближена формула

$$\bar{\mu}_n = \frac{\pi}{2}(2n + 1).$$

В результаті власна частота вільних вигибних гармонічних коливань пружного стрижня визначається відповідно формулі

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{\bar{a} \mu_n^2}{2\pi l^2}.$$

Співвідношення, що зв'язує довжину  $l$  і товщину  $h$  стрижня, набуває вигляду

$$l = \sqrt{h} \frac{\bar{\mu}_n}{2\sqrt{\pi} f_n} \left( \frac{E}{3\rho_c} \right)^{1/4}. \quad (5)$$

Формула (5) дозволяє для заданої частоти коливань і заданих фізичних параметрів матеріалу стрижня розрахувати його оптимальні геометричні параметри з точки зору ефективності збудження коливань. Зокрема, для матеріалу з параметрами  $E = 20,6 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>,  $\rho = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $h = 3 \cdot 10^{-3}$  м,  $\mu_n = 10,996$  довжина стрижня при частоті коливань  $f = 1$  кГц дорівнює  $l = 0,293$  м.

При переході до даної задачі другого етапу, припустимо, що довжина хвилі випромінюваних хвиль значно більше відстані між стрижнями решітки. Далі припустимо, що коливальна швидкість поверхонь стрижнів однакова і залежить від часу за гармонійним законом  $e^{-j\omega t}$ .

Крім того, коливальна швидкість, направлена перпендикулярно поверхонь стрижнів (вісь  $z$ ), визначається похідною за часом від функції, яка описує власні пружні згинаючі коливання стрижнів, і може бути розрахована за формулою

$$V_0 = -j\omega \frac{1}{l} \int_0^l u(x, \omega) dx, \quad (6)$$

де функція  $u$  має вигляд (2) і є власною функцією завдання (1). Тобто, коливальна швидкість для гармонійних коливань пропорційна величині зсуву поверхні стрижня усередненої по його довжині, а частота  $f = \omega/2\pi$  збігається з однією з власних частот згинаючих коливань стрижня і може бути розрахована за формулою (4).

Оскільки довжина хвилі значно більше відстані між стрижнями, то замінимо кінцеву систему стрижнів нескінченною періодичною решіткою з деяким періодом  $d$  і знехтуємо товщиною стрижня. В такому випадку можна обмежитися двовимірним завданням ( $\frac{\partial}{\partial x} \equiv 0$ ,

$x$  – змінна уздовж осей стрижнів).

Розглянута періодична решітка знаходиться в рідині з рівноважними значеннями швидкості поширення звуку  $c_0$ , щільністю  $\rho_0$  і коефіцієнтом в'язкості  $\eta_0$ . При зроблених припущеннях основне рівняння звукових коливань має такий вигляд [14]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \gamma \frac{\partial u}{\partial t} - c_0^{-2} \Delta u = 0, \quad (7)$$

де коефіцієнт загасання  $\gamma$  для гармонійних коливань може бути обчислений відповідно до виразу

$$\gamma \cong \frac{4 \omega^2 \eta_0}{3 c_0^2 \rho_0}.$$

Вирішення завдання (7) відбувається методом часткових областей [15]. З цією метою функція  $u$  розкладається в ряди Фур'є за змінною  $y$  (вісь  $y$  лежить в площині стрижнів і на ній розташовані їхні періоди) в півпросторі  $z > 0$  і півпросторі  $z < 0$ . У цьому випадку функція  $u$  в півпросторах  $z > 0$  ( $z < 0$ ) є суперпозицією плоских хвиль, що розходяться від решітки при  $z \rightarrow \pm\infty$ .

Щоб знайти коефіцієнти рядів Фур'є  $a_n$  необхідно вимагати безперервності потенційної функції  $u$  і її похідної  $\partial u / \partial z$  на площині  $z = 0$  при  $|y + id| < \frac{b}{2}$ ,  $i = 0, \pm 1, \dots$  (тобто на щілинах решітки) [16]. Де  $i$  – номер стрижня.

Оскільки для даної задачі довжина хвилі випромінювання значно перевершує період решітки, тобто  $|kd/2\pi| \sim 10^{-2}$ , то використовуємо метод послідовних наближень і обмежувачись нульовим наближенням, можна отримати явні вирази для амплітуд  $a_n$ :

$$a_0 = -\frac{j \rho_0 W_0 V_0 d}{2\pi(1 - j W_0 \kappa)}, \quad a_n = \frac{d V_{n-1}^{-1}}{2\pi n} \rho_0 V_0 \left( -j + \frac{W_0 \kappa}{1 - j W_0 \kappa} \right), \quad (8)$$

де  $\kappa = kd/2\pi$ ;  $k = \sqrt{\omega(\omega + j\gamma)}/c_0$  – хвильове число;  $\rho_0$  – стаціонарний тиск в рідині;

$$W_0 = \ln \frac{1 + \cos \frac{\pi b}{d}}{2} = 2 \ln \left| \cos \frac{\pi b}{2d} \right|.$$

Як легко бачити, амплітуди  $a_n$  пропорційні швидкості коливань  $V_0$  поверхонь стрижнів решітки і залежать від геометричних параметрів, а саме відношенням ширини стрижнів до періоду решітки  $b/d$ .

Розрахунки показали, що пульсації швидкості потоку рідини  $V_z$ , а також тиску  $p - p_0$  можуть бути визначені з

$$V_z \cong V_0 \frac{\kappa W_0}{1 - j W_0 \kappa} e^{jkz}, \quad (9)$$

$$p - p_0 \cong \frac{(j\gamma - \omega) \rho_0 W_0 V_0 d}{2\pi(1 - j W_0 \kappa)} e^{jkz}, \quad (10)$$

Як видно з (9), (10), основний фактор, який впливає на поля швидкостей і тисків, має такий вигляд

$$\frac{\kappa W_0}{1 - j W_0 \kappa}. \quad (11)$$

Проаналізуємо, як залежить величина (11) від частотного параметра  $\kappa = kd/2\pi$  і геометричного параметра  $b/d$ . Будемо припускати, що втрати в рідині, де знаходяться решітки стрижнів, малі, тобто  $\gamma/\omega \ll 1$ , тоді хвильове число  $k = \sqrt{\omega(\omega + i\gamma)}/c_0$  можна представити у вигляді

$$k \approx \frac{\omega}{c_0}(1 + i0,5\nu),$$

де  $\nu = \gamma/\omega$ .

Максимального значення модуль фактору (11) досягає при виконанні умови

$$l + 0,5W_0 \kappa_0 \nu = 0. \quad (12)$$

Отже, при виконанні умови (12) швидкість і тиск в випромінюваній хвилі максимальні. Можна зробити висновок, що оптимальне співвідношення між шириною стрижня і періодом решітки виглядає як

$$\frac{b}{d} = \frac{2}{\pi} \arccos \left[ \exp \left( -\frac{3c_0^3 \rho_0}{8d f_n^2 \eta_0 \pi} \right) \right], \quad (13)$$

де  $f_n = \frac{\mu_n^2 h}{4\pi l^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho_c}}$ ,  $\mu_1 = 4,735$ ,  $\mu_2 = 7,857$ ,  $\mu_3 = 10,996$ .

Таким чином, отримана формула дозволяє розраховувати оптимальні геометричні параметри решітки стрижнів і моделює гідродинамічний випромінювач. З графіка (рис. 2) видно, що для частоти 1–2 кГц ширина стрижня має бути 4–5 мм.

Розглянемо завдання про взаємодію звукових коливань, збуджуваних решітками пружних стрижнів, з шаром волокнистих матеріалів. В якості моделі волокнистого матеріалу обрано суцільне середовище, що заповнює на півпростір з параметрами:  $\rho$  – щільність середовища,  $\bar{h}$  – швидкість звуку в волокнах матеріалу,  $\eta$  – коефіцієнт в'язкості. Завдання розглядається в лінійному наближенні та двовимірній постановці. Основна увага приділяється визначенню оптимальних геометричних параметрів решітки, при яких відбувається максимальне поглинання енергії звукових коливань в суцільному середовищі, що моделює волокна матеріалу.

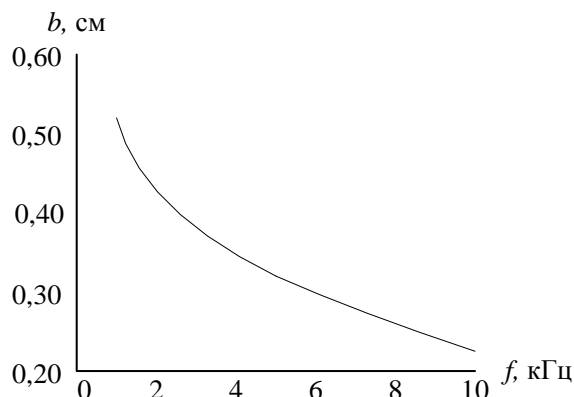


Рис. 2. Залежність ширини стрижня  $b$  перетворювача від частоти  $f$

Як і вище, решітка передбачається необмеженою, періодичною вдовж осі  $y$  і розташовується в площині  $z = 0$ . Решітка знаходиться в рідині зі щільністю  $\rho_0$ , швидкістю поширення

звуку  $\tilde{n}_0$  і коефіцієнтом в'язкості  $\eta_0$ . На відстані  $a$  від площини решітки розташована межа суцільного середовища, яка моделює волокна матеріалу. На межі цього середовища задаються умови сполучення – рівність тисків і нормальних швидкостей з боку рідини і суцільного середовища. Введемо дві потенційні функції  $u$  і  $u_0$  для суцільного середовища ( $z > a$ ) і рідини ( $z < a$ ) відповідно. Рідина характеризується коефіцієнтом загасання  $\gamma_0 = \frac{4\omega^2 \eta_0}{3c_0^2 \rho_0^2}$ ,

$$\text{суцільне середовище} - \gamma = \frac{4\omega^2 \eta}{3c^2 \rho^2}.$$

Без урахування залежності від часу функції  $u$  і  $u_0$  задовольняють рівнянням:

$$\Delta u + k^2 u = 0, \quad z > a, \quad (14)$$

$$\Delta u_0 + k_0^2 u_0 = 0, \quad z < a. \quad (15)$$

де

$$k^2 = \frac{\omega(\omega + j\gamma)}{c^2}, \quad k_0^2 = \frac{\omega(\omega + j\gamma_0)}{c_0^2}.$$

Представляючи функції  $u$  і  $u_0$  у вигляді рядів Фур'є за змінною  $y$  (за аналогією з тим, як це було зроблено вище), отримуємо системи рівнянь з невідомими коефіцієнтами. Визначення коефіцієнтів здійснюється з урахуванням умов сполучення на межі середовищ.

У нульовому наближенні отримуємо:

$$u \cong y_0 \frac{e^{jk_0 a}}{\theta_0 + \theta} e^{jk(z-a)}, \quad z > a, \quad (16)$$

$$u_0 \cong \begin{cases} 0,5 y_0 \left( e^{jk_0 z} + e^{j2k_0 a} \frac{\theta - \theta_0}{\theta + \theta_0} e^{-jk_0 z} \right), & 0 < z < a, \\ -0,5 y_0 \left( 1 + e^{j2k_0 a} \frac{\theta - \theta_0}{\theta + \theta_0} \right) e^{-jk_0 z}, & z < 0 \end{cases} \quad (17)$$

Тут 
$$y_0 \cong -\frac{\rho_0 d V_0 W_0}{\pi} \left[ 1 - j \kappa_0 W_0 \left( 1 + e^{j2k_0 a} \frac{\theta_0 - \theta}{\theta_0 + \theta} \right) \right]^{-1}, \quad (18)$$

$$y_n \cong -\frac{\rho_0 d V_0 W_0 V_{m-1}^{-1}}{\pi n} \left[ 1 - j \kappa_0 W_0 \left( 1 + e^{j2k_0 a} \frac{\theta_0 - \theta}{\theta_0 + \theta} \right) \right]^{-1}, \quad (19)$$

де  $\theta = \frac{\bar{k}^2 c^2}{k_0^2 c_0^2}$ ,  $\theta_n = \frac{\rho_0 \Gamma_{1n}}{\rho \Gamma_n}$ , а риска позначає операцію комплексного сполучення;

$$\Gamma_n = \sqrt{k_0^2 - \left( \frac{2\pi n}{d} \right)^2}, \quad \Gamma_{1n} = \sqrt{k^2 - \left( \frac{2\pi n}{d} \right)^2}.$$



Оскільки швидкість і тиск пульсацій рідини в воді і волокнах матеріалу виражаються через потенційні функції ( $\vec{V}_0 = \frac{1}{\rho_0} \text{grad } u_0$ ,  $p_0 = \frac{\partial u_0}{\partial t} - \gamma_0 u_0$ ,  $\vec{V} = \frac{1}{\rho} \text{grad } u$ ,  $p = \frac{\partial u}{\partial t} - \gamma u$ ), розраховано усереднене по періоду решітки стрижнів значення тиску в шарі волокнистого матеріалу:

$$p_{\text{ср}} \cong \frac{(\gamma + j\omega) e^{jk_0 a} d \rho_0 V_0 W_0}{(\theta_0 + \theta) \pi \left[ 1 - j \kappa_0 W_0 \left( 1 + \frac{\theta_0 - \theta}{\theta_0 + \theta} e^{j2k_0 a} \right) \right]} e^{jk(z-a)}, \quad (20)$$

На підставі виразу (20) проведено розрахунок залежності інтенсивності випромінювання звукових коливань від ширини  $b$  стрижнів випромінювача,  $0 \leq b \leq 6 \cdot 10^{-3}$  м (рис. 3). Як видно, інтенсивність випромінювання зменшується зі зменшенням ширини стрижнів. Коли ширина стрижнів наближається до величини періоду решітки спостерігається різке зростання інтенсивності випромінювання. Отже, для отримання досить високої інтенсивності випромінювання необхідно вибрати ширину стрижнів близькою до періоду решітки.

На рис. 4 представлена залежність інтенсивності звукової хвилі від товщини шару волокнистого матеріалу  $\delta$ ,  $0 \leq \delta \leq 0,2$  м для різних значень швидкості коливань.

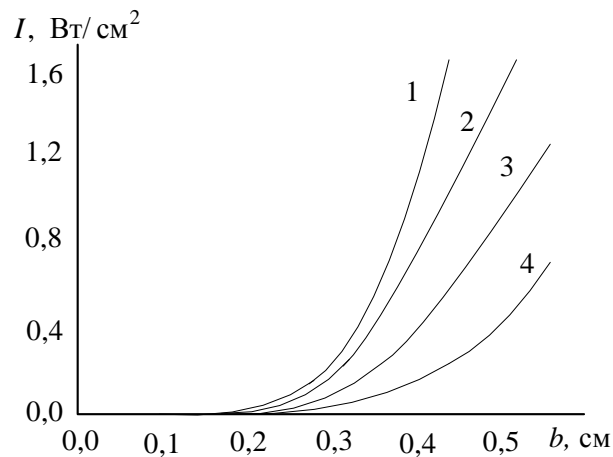


Рис. 3. Залежність інтенсивності випромінювання звукових коливань від ширини стрижнів випромінювача: 1 –  $V_1 = 0,2$  м/с; 2 –  $V_2 = 0,15$  м/с; 3 –  $V_3 = 0,1$  м/с; 4 –  $V_4 = 0,05$  м/с

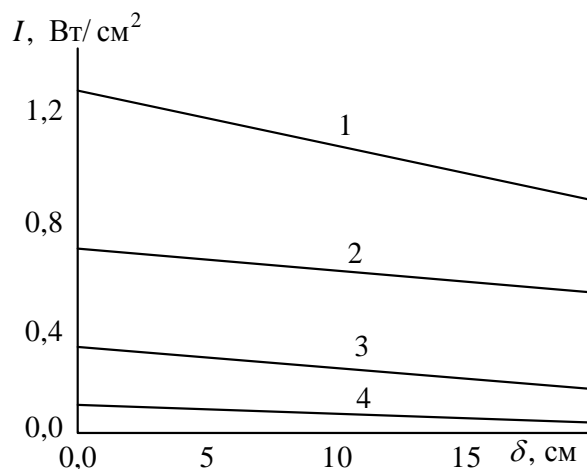


Рис. 4. Залежність інтенсивності звукової хвилі від товщини шару волокнистого матеріалу при постійних значеннях швидкості коливань: 1 –  $V_1 = 0,2$  м/с; 2 –  $V_2 = 0,15$  м/с; 3 –  $V_3 = 0,1$  м/с; 4 –  $V_4 = 0,05$  м/с

Аналіз залежностей (рис. 3, 4) показав, що при малих значеннях швидкості коливань ( $V_4 = 0,05$  м/с) інтенсивність практично не залежить від товщини шару волокнистого матеріалу, проте слід зазначити, що величина інтенсивності є незначною ( $\delta \leq 0,1$  Вт/см<sup>2</sup>). Зі збільшенням швидкості коливань інтенсивність випромінювання зростає і суттєво залежить від товщини шару матеріалу. Отже, для отримання інтенсивності порядку 1 Вт/см<sup>2</sup> в шарі волокнистого матеріалу товщиною близько 0,15 м коливальна швидкість повинна складати  $V_1 = 0,2$  м/с.

### Експериментальні дослідження з визначення конструктивних параметрів ГДВ і параметрів звукових коливань

Метою експерименту було уточнення конструктивних параметрів ГДВ у вигляді періодичної решітки в одній площині. Для визначення оптимальних конструктивних параметрів ГДВ (довжина стрижнів, ширина стрижнів, кількість стрижнів) був проведений багатофакторний експеримент, де  $X_1, X_2, X_3$  кодовані значення, а не фізичні параметри ГДВ. В якості відгуку була взята частота звукових коливань, яку випромінює ГДВ.

Частота акустичних коливань вибрана для промивання волокон з умови знищення мікроорганізмів і спор (у 1 г вовни знаходиться до 700 млн. мікроорганізмів і спор). Крім того, вибрана частота повинна відмивати жиропіт з поверхні волокон і не впливати на природні міцнісні властивості волокон. Відділення кульок жиру з поверхні волокон можливе при частоті 1 – 3 кГц. Відділення кульок жиру, знезараження волокон і промивних вод на інших частотах є проблематичним. Частота звукових коливань вимірювалася п'єзоелектричним датчиком, який було виготовлено в навчально-науковому інституті енергетики та комп'ютерних технологій (м. Харків). Максимальна чутливість п'єзоелектричного датчика становила  $S = 1,59$  мкВ·м<sup>2</sup>/Н на частоті 1 – 30 кГц. Для експериментальних досліджень була використана ємність з об'ємом 50 л. В якості миючого засобу використовувався водний мильно-содовий розчин. Для подачі миючого розчину до плоского ГДВ використовувався відцентровий багатосекційний насос НСГ4-60 (Україна), з подачею 4 м<sup>3</sup>/час і напором 60 м. Тиск, що створювався насосом, вимірювався зразковим манометром типу МО11202 (Україна).

Значення факторів і інтервали варіювання наведені в таблиці:

Інтервал і рівень факторів	Довжина стрижнів, см	Ширина стрижнів, мм	Кількість стрижнів, шт.
	$X_1$	$X_2$	$X_3$
Нульовий рівень $X_i = 0$	28	3	19
Інтервал варіювання $\lambda_i$	2	1	1
Верхній рівень $X_i = +1$	30	4	20
Нижній рівень $X_i = -1$	26	2	18

При використанні стандартної методики побудови планів другого порядку складені матриці: планування експерименту, розрахунку коефіцієнтів регресії, визначення дисперсії адекватності [17, 18]. Після проведення змін і розрахунків отримано рівняння регресії, яке пов'язано з  $X_i$ -кодованими факторами та емпірично визначаємими коефіцієнтами  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$ , що визначають плин процесу:

$$Y = 1,4 + 1,2X_1 + 1,0X_2 + 0,3X_3 + 2,0X_1X_2 + 1,8X_1X_3 + 1,5X_2X_3 + 1,6X_1^2 + 0,5X_2^2 + 0,2X_3^2, \quad (21)$$

де  $Y$  – частота звукових коливань;  $X_1$  – кодоване значення довжини стрижнів;  $X_2$  – кодоване значення ширини стрижнів;  $X_3$  – кодоване значення кількості стрижнів.

Оскільки рівняння регресії (21) пов'язане з кодованими значеннями  $X_1, X_2, X_3$  та емпірично визначаємими коефіцієнтами  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$ , то порівняння цих значень зі значеннями на рис. 2 є зовсім некоректним.

Перевірка значущості коефіцієнтів регресії проводилася при рівні значущості  $\alpha = 0,001$  за критерієм Стьюдента [17, 18]. Всі коефіцієнти в рівнянні (21) виявилися значущими.

На підставі перевірки даного рівняння на адекватність моделі за критерієм Фішера [17 – 21] зроблено висновок, що рівняння адекватно описує реальний процесом, і, отже, дозволяє оцінити характер впливу кожного з чинників на функцію відгуку. Крім того, стало можливим практичне використання отриманої моделі для прогнозування значень вихідного параметра  $Y$  в області варіювання параметрів  $x_i$ . Для знаходження оптимальних параметрів процесу вирішено систему рівнянь в якій прирівняли до нуля значення градієнтів компонентів, що обчисленні за виразом

$$\frac{\partial Y}{\partial x_i} = b_i + 2b_{ii}x_i + \sum_{j=1}^n b_{ij}x_j = 0, \quad (22)$$

де  $x_i, x_j$  – кодоване значення фактору, по якому береться похідна, та взаємодіюча з ним, відповідно;  $b_i, b_{ii}, b_{ij}$  – коефіцієнти рівняння регресії.

Для виразу (21) отримано систему рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Y}{\partial X_1} &= 1,2 + 2X_2 + 1,8X_3 + 2 \times 1,6X_1 = 0; \\ \frac{\partial Y}{\partial X_2} &= 1,0 + 2X_1 + 1,5X_3 + 2 \times 0,5X_2 = 0; \\ \frac{\partial Y}{\partial X_3} &= 0,3 + 1,8X_1 + 1,5X_2 + 2 \times 0,2X_3 = 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Рішення системи рівнянь (31) дає наступні значення чинників в оптимальній точці:  $X_1 = -1; X_2 = 1; X_3 = 0$ , що відповідає таким значенням конструктивних параметрів плоского ГДВ звукових коливань: довжина стрижнів 26 см; ширина стрижнів 4 мм; кількість стрижнів 19 шт.; частота звукових коливання 1,3 кГц. Для даної моделі ГДВ звукових коливання товщина стрижнів становила величину 1,3 мм, а період решітки 5 мм. Величина інтенсивності звукових коливань на частоті 1,3 кГц становила 1,2 Вт/см<sup>2</sup>, а коливальна швидкість 0,21 м/с.

Інтенсивність і коливальна швидкість вимірювалися на відстані  $7 \cdot 10^{-3}$  м від площини випромінювача звукових коливань.

Такі параметри дозволили отримати якісно промитий волокнистий матеріал із залишком жиру на волокнах в межах 1,5 %, вміст мінеральних забруднень менше 1 %. В контролі для немитого волокнистого матеріалу розривне навантаження становило 802,6 сН, а відносна міцність 4,68 сН/текс. Для волокнистого матеріалу, який оброблено звуковими коливаннями, розривне навантаження склало 796,8 сН, а відносна міцність 4,3 сН/текс [4].

Для промивання волокнистих матеріалів запропоновано конструкцію ГДВ з направленим потоком рідини і ефективним перетворенням її в енергію звукових коливань.

Джерелом звукових коливань є система стрижнів, розташованих в дні випромінювача що збуджуються потоком рідини, яка падає на них. Даний ГДВ являє собою пристрій, що складається з корпусу прямокутного перерізу з квадратною трубою всередині, трьох конічних насадок, що сходяться, і приєднаних до цієї труби, з щілинними вихідними отворами. Струмені миючого розчину виходять з щілинних отворів конічних насадок, що сходяться, з великою швидкістю і відповідно з розвитою турбулентністю. Струмені, потрапляючи на стрижні плоского ГДВ, здійснюють динамічний вплив на них, примушуючи здійснювати коливання з великою інтенсивністю. Це призводить до генерування інтенсивних звукових коливань.

Струмені рідини, проходячи через щілину випромінювача, в результаті збільшують свою турбулентність, що призводить до виникнення кавітаційних процесів зі значною пульсацією швидкості і тиску, які, в свою чергу, також генерують звукові коливання. Ці коливання зі значною пульсацією тиску і швидкістю руху миючого розчину сприяють інтенсивному відділенню забруднень від волокнистих матеріалів. Струмінь миючого розчину рідини, який виходить через щілину ГДВ, виносить забруднення в об'єм миючої барки, заважаючи вторинному осіданню забруднень на волокна. Для визначення оптимальних параметрів гідродинамічного випромінювача звукових коливань була розглянута хвиля одиночного стрижня і хвиля від періодичної системи стрижнів. Визначення параметрів системи ГДВ були уточнені в результаті багатофакторного експерименту.

Дослідження коливань одиночного стрижня дало можливість визначити його геометричні та фізичні параметри для отримання потрібної частоти ультразвуку. Перехід від одиночного коливаючого стрижня до періодичної решітки дає можливість обчислити характеристики ансамблю коливаючих стрижнів з урахуванням періоду і взаємодії одного з одним.

Теоретичні дослідження показують, що для мийки волокнистих матеріалів, наприклад вовни, в безперервному потоці необхідно використовувати плоскі гідродинамічні перетворювачі звукових коливань на частоті 1 – 2 кГц з такими параметрами: довжина стрижнів 25 – 30 см; ширина стрижнів 3 – 4 мм; товщина стрижнів 1 – 2 мм; період решітки перетворювача 5 – 6 мм; кількість стрижнів 18 – 20.

Для промивання шару волокнистого матеріалу товщиною 0,15 – 0,20 м на сітчастому транспортері необхідна інтенсивність звукових коливань 1 – 1,5 Вт/см<sup>2</sup> з коливальною швидкістю не менше 0,2 м/с. ГДВ з частотою звукових коливань 1 – 2 кГц і інтенсивністю 1 Вт/см<sup>2</sup> повинен розташовуватися над шаром матеріалу на відстані  $5 \cdot 10^{-3}$  м. В результаті багатофакторного експерименту були уточнені конструктивні параметри ГДВ звукових коливань: довжина стрижнів 26 см; ширина стрижнів 4 мм; кількість стрижнів 19 шт.; частота звукових коливань 1,3 кГц. Для даної моделі ГДВ звукових коливань товщина стрижнів становила величину 1,3 мм, а період решітки 5 мм. Величина інтенсивності звукових коливань на частоті 1,3 кГц становила 1,2 Вт/см<sup>2</sup>, а коливальна швидкість 0,21 м/с. Інтенсивність і коливальна швидкість вимірювалися на відстані  $7 \cdot 10^{-3}$  м від площини випромінювача звукових коливань.

Дана конструкція ГДВ буде сприяти підвищенню якості промивки волокнистих матеріалів та зменшенню енергетичних витрат на технологічний процес мийки. Підвищення якості промивки волокнистих матеріалів досягається за рахунок створення інтенсивного спрямованого звукового поля та швидкісного спрямованого потоку миючого розчину.

Технологія промивки волокнистих матеріалів на основі гідродинамічного випромінювача звукових коливань не потребує очисних споруд.

ГДВ, що пропонується, дозволить вирішувати такі важливі задачі в обробці волокнистих матеріалів як: зниження матеріалоємності обладнання; економія виробничої площі; зменшення витрати води; скорочення обслуговуючого персоналу.

Застосування ГДВ для обробки волокнистих матеріалів дозволить виключити негативний вплив технологічного процесу на навколишнє середовище, повністю автоматизувати процес обробки матеріалу, провести знезаражування матеріалу та стічних вод.

ГДВ звукових коливань необхідні для обробки шубних, хутряних, волокнистих та лляних матеріалів. Недоліками ГДВ звукових коливань є складність в його побудові та обмеження товщини шару і волокнистого матеріалу для обробки. Подальші дослідження будуть спрямовані на удосконалення параметрів ГДВ для підвищення товщини шару обробляемого матеріалу, що обробляється.

## **Висновки**

1. Теоретичні та експериментальні дослідження показують, що для мийки волокнистих матеріалів в безперервному потоці необхідно використовувати гідродинамічні перетворювачі

звукових коливань на частоті 1,3 кГц з такими параметрами: довжина стрижнів – 26 см; ширина стрижнів – 4 мм; товщина стрижнів – 1,3 мм; період решітки перетворювача – 5 мм; кількість стрижнів – 19 шт.

2. Гідродинамічний випромінювач з частотою звукових коливань 1,3 кГц, інтенсивністю  $1,2 \text{ Вт/см}^2$  і з коливальною швидкістю не менше 0,2 м/с повинен розташовуватися над шаром волокнистого матеріалу на відстані  $7 \cdot 10^{-3}$  м.

#### Список літератури:

1. Вовна. Первинна обробка та ринок / Н. Рогачов, Л. Васильєва, Н. Тимошенко. Москва, 2000. 600 с.
2. Батеуп Б. О. Оптимізація процесу водяного очищення // Симпозіум CSIRO Шерсть для штурування та камвольного кардинга. 1986. С. 8 – 16.
3. Косуліна Н. Визначення параметрів електромагнітного випромінювання для енергоінформаційної дезінфекції вовни при її попередній обробці / Косуліна Н., Черенков А., Чорна М. // Східноєвропейський журнал корпоративних технологій. 2017, № 2/5 (86). С. 52 – 59.
4. Михайлова Л. Визначення параметрів акустичної системи для основної обробки вовни / Л. Михайлова, Н. Косуліна, А. Черенков // Східноєвропейський журнал корпоративних технологій. 2018, № 3/5 (93). С. 61 – 69.
5. Peila R. Washing off intensification of cotton and wool fabrics by ultrasounds / Peila R., Actis G // Ultrasonics Sonochemistry. 2015, №23. P. 324 – 332.
6. Ibrahim M., Kerim B. A study on the usability of ultrasound in scouring of raw wool // Journal of Cleaner Production. 2013, №41. P. 283 290
7. Ceria A. The effect of an innovative atmospheric plasma jet treatment on physical and mechanical properties of wool fabrics / Ceria A., Rombaldoni F. // Journal of Materials Processing Technology. 2010. P. 720 726.
8. Zhang R. Modification of wool by air plasma and enzymes as a cleaner and environmentally friendly process / Zhang R., Wang A. // Journal of Cleaner Production. 2015, №87. P. 961 – 965.
9. Zhang Y. Pulsed electrohydraulic discharge for wool fiber cleaning / Zhang Y., Pang G. // Journal of Cleaner Production. 2016, №112, 1033 – 1039.
10. Actis G. Use of the ultrasonic cavitation in wool dyeing process: Effect of the dye-bath temperature / Actis G., Grande M. // Ultrasonics Sonochemistry. – 2017, №35. – P. 276 – 284.
11. Carran R. The effects of zeolite molecular sieve based surface treatments on the properties of wool fabrics / Carran R., Ghosh A. Applied Surface Science. 2013, № 287. P. 467 – 472.
12. Pan Y. Effect of sonochemical scouring on the surface morphologies, mechanical properties, and dyeing abilities of wool fibres / Pan Y., Hurren C. // Ultrasonics Sonochemistry. 2018, № 41. P. 227 – 233.
13. Адлер В. Э. Групповой анализ дифференциальных уравнений / В. Э. Адлер И. Т. Хабибулин, И. Ю. Черданцев. – Уфа : Наука, 2013. 73с.
14. Основи акустики / В. Т. Грінченко, І. В. Вовк, В. Т. Маципура. Київ : Наук. думка, 2007. 640 с.
15. Іваницький А. М. Основи електродинаміки і принципи дуальності. Одеса : ОНАС ім. А. С. Попова, 2012. 156с.
16. Теорія коливань та хвиль / М.О. Азаренков, В.О. Гірка, В.І. Лапшин, В.І. Муратов. Харків, 2005. 154 с.
17. Аугамбаев М. Основы планирования научно-исследовательского эксперимента / М. Аугамбаев, А.З. Иванов, Ю. И. Терехов. Ташкент : Укитувчи, 2004. 336с.
18. Методика и практика планирования и организации эксперимента / К. В. Щурин, Д. А. Косых. Одесса : ОГУ, 2012. 185 с.
19. H.F. Ismail Saied, A.K. Al\_Omari, O.G. Avrunin. An Attempt of the Determination of Aerodynamic Characteristics of Nasal Airways // Image Processing & Communications, challenges3, AISC 102. pp 303-310 Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. P. 311-322.
20. A.K. Al\_Omari, H.F. Ismail Saied, O.G. Avrunin, Analysis of Changes of the Hydraulic Diameter and Determination of the Air Flow Modes in the Nasal Cavity // Image Processing & Communications, challenges3, AISC 102. Springer – Verlag Berlin Heidelberg.-2011: P. 303-310.
21. The role of paranasal sinuses in the aerodynamics of the nasal cavities / H. Farouk, E. Abaida, A. Khaleel, O. Avrunin // International Journal of Life Science and Medical Research. 2012. Vol. 2. №3. P.52-55.

Подільський державний  
аграрно-технічний університет;  
Харківський національний  
університет радіоелектроніки;  
Харківський національний технічний університет  
сільського господарства імені Петра Василенка

Надійшла до редколегії 05.02.2019