ІІІ. ПЕРЕРОБНІ ТА ХАРЧОВІ ВИРОБНИЦТВА

Берник І. М.

Вінницький державний аграрний університет

Гришко І. А.

Луговський О. Ф.

НТУУ «Київський політехнічний інститут»

УДК 621.031:664.292

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КАВІТАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ГІДРОЛІЗУ-ЕКСТРАГУВАННЯ ПЕКТИНУ

В статье представлены экспериментальные исследования распределения ультразвукового поля в жидкой среде с дисперсными частичками. Предложены конструкции проточных ультразвуковых кавитационных аппаратов для гидролиза-экстракции пектина.

In the article experimental researches of distributing of the ultrasonic field are presented in a liquid environment with dispersion particles. The constructions of running ultrasonic cavitations vehicles are offered for the hydrolysis-extraction of pectin.

Експериментальне дослідження процесу гідролізу-екстракції в ультразвуковому полі, по перше, підтвердило доцільність застосування ультразвукової кавітації в процесі видобутку пектину з рослинної сировини, а по друге, дозволило встановити особливості розповсюдження ультразвукових хвиль в технологічній суміші рослинного походження. Дослідження показало, що у випадку застосування технологічної суміші, утвореної розчином яблучних вичавок у воді з концентрацією 15...30%, завдяки поглинальним та розсіювальним властивостям суміші ефективність процесу зберігається на відстані до 30 мм від вібруючої поверхні ультразвукового привода-випромінювача при інтенсивності ультразвукової хвилі в межах 2...10 Вт/см^2.

Тому, технологічне обладнання для реалізації процесу гідролізу-екстракції пектину в ультразвуковому кавітаційному середовищі повинно забезпечити ефективну кавітаційну обробку технологічної суміші в шарі товщиною до 30 мм.

Розглянемо дві основні схеми побудови ультразвукового технологічного обладнання для гідролізу-екстракції пектину із рослинної сировини.

Перша схема передбачає застосування проточного лотка, в донній поверхні якого встановлені напівхвильові резонансні приводи-випромінювачі. Товщина шару технологічної суміші задається сталевою стрічкою, що рухається паралельно лотку і віддалена від поверхні випромінювачів на відстань, що дорівнює половині довжини ультразвукової хвилі в технологічній суміші. Таке розміщення стрічки забезпечує ефективне відбиття від її поверхні в шар суміші ультразвукової хвилі і утворення в шарі стоячої хвилі деформації. При цьому, введена в суміш, ультразвукова енергія максимально ефективно використовується для утворення кавітаційного середовища.

Друга схема передбачає транспортування технологічної суміші під тиском крізь зазор між двома коаксіально розміщеними товстостінними трубами. Радіальний зазор між трубами становить половину довжини ультразвукової хвилі в суміші. На твірній поверхні зовнішньої труби розміщені ультразвукові резонансні приводи-випромінювачі, оснащені ножевидними трансформаторами швидкості. Приводи-випромінювачі в межах однієї секції приводів збуджують в зовнішній трубі радіально-згинні коливання, а здовж труби між секціями приводів збуджуються поздовжньо-згинні коливання. Прокачування суміші під тиском дозволяє підвищити інтенсивність кавітаційної обробки.

В основі ультразвукового резонансного привода-випромінювача лежить

напівхвильовий п'єзоелектричний перетворювач Ланжевєна. Застосування в якості збуджувача ультразвукових коливань п'єзоелектричної кераміки доречне завдяки тому, що сучасні состави кераміки забезпечують їй майже в 2,5 рази більший ККД у порівнянні з магнітострикційними перетворювачами.

Методика розрахунку ультразвукового технологічного обладнання для гідролізу-екстракції пектину базується на рекомендаціях, викладених в роботах [1].

Напівхвильовий перетворювач, у відповідності до розрахункової схеми (рис. 1), складається з послідовно механічно з'єднаних випромінюючої накладки, п'єзокерамічного пакету та демпфуючої накладки, призначеної для узгодження (пониження) частоти.

В загальному вигляді рівняння поздовжніх коливань п'єзоелектричного складеного перетворювача можна записати як

$$S\,\frac{\partial^2 \xi}{dt^2} = c^2\,\frac{\partial}{\partial x}\left(S\,\frac{\partial \xi}{\partial x}\right) \qquad (1)$$

де ξ - поздовжнє переміщення ; c - швидкість звуку; S - площа поперечного перерізу; x - напрямок розповсюдження хвиль.

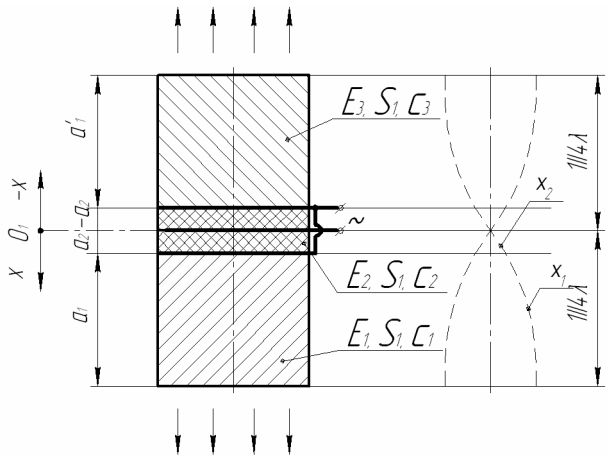

Рис. 1. Розрахункова схема напівхвильового складеного п'єзоелектричного перетворювача

Для перетворювача, що здійснює гармонічні коливання та має деяку власну частоту, розв'язок рівняння (1) можна представити у вигляді

$$\xi(x,t) = \varepsilon(x)\left(P\,\sin\,\omega t + Q\,\cos\,\omega t\right)$$

де $\omega = 2\pi f$; f - частота резонансних коливань.

Тоді, для накладки, що дозволяє узгодити частоту коливань, та прилеглої до неї шайби п'єзокерамічного пакету можна записати відповідно

$$\xi_1(x,t) = \left(A\cos\frac{\omega}{c_1}x + B\sin\frac{\omega}{c_1}x\right)\sin(\omega t + \varphi) \qquad (2)$$

та

$$\xi_2(x,t) = \left(C\cos\frac{\omega}{c_2}x + D\sin\frac{\omega}{c_2}x\right)\sin(\omega t + \varphi), \qquad (3)$$

де c_1 і c_2 - швидкість звуку в матеріалі узгоджувальної накладки та п'єзокерамічної шайби відповідно.

Вибираючи в розрахунковій схемі (рис. 1) початок координат в точці O_1, граничні умови, щодо напівхвильової коливальної системи можна представити у вигляді

$$\xi_2 = 0 \quad \text{при} \quad x = 0; \qquad (4)$$

$$\frac{\partial \xi_1}{\partial x} = 0 \quad \text{при} \quad x = a_1 + a_2; \qquad (5)$$

$$\left.\begin{aligned} \xi_1 &= \xi_2 \\ E_1 S_1 \frac{\partial \xi_1}{\partial x} &= E_2 S_2 \frac{\partial \xi_2}{\partial x} \end{aligned}\right\} \quad \text{при} \quad x = a_2; \qquad (6)$$

де a_1 , E_1 , S_1 і a_2 , E_2 , S_2 - товщина, модуль пружності на розтягування та площа торцевої поверхні узгоджувальної накладки та п'єзокерамічної шайби відповідно.

Врахування умови (4) дозволяє з рівняння (3) отримати

$$C = 0 \qquad (7)$$

Тоді можна записати

$$\xi_2(x,t) = D\,\sin\frac{\omega}{c_2}x\,\sin(\omega t + \varphi) \qquad (8)$$

Врахування умови (5) дозволяє рівняння (2) переписати у вигляді

$$B\cos\frac{\omega}{c_1}(a_1 + a_2) = A\sin\frac{\omega}{c_1}(a_1 + a_2).$$

Звідки

$$B = Atg\,\frac{\omega}{c_1}(a_1 + a_2), \qquad (9)$$

Підставивши (9) у рівняння (2), отримаємо

$$\xi_1(x,t) = A\left[\cos\frac{\omega}{c_1}x + \sin\frac{\omega}{c_1}x\,tg\,\frac{\omega}{c_1}(a_1 + a_2)\right]\sin(\omega t + \varphi), \qquad (10)$$

Врахування першої половини граничних умов (6) дає можливість рівняння (8) та (10) переписати у вигляді

$$D\sin\frac{\omega}{c_2}a_2 = A\left[\cos\frac{\omega}{c_1}a_2 + \sin\frac{\omega}{c_1}a_2 tg\frac{\omega}{c_1}(a_1+a_2)\right].$$

Звідки

$$D = \frac{A}{\sin\frac{\omega}{c_2}a_2}\left[\cos\frac{\omega}{c_1}a_2 + \sin\frac{\omega}{c_1}a_2 tg\frac{\omega}{c_1}(a_1+a_2)\right], \quad (11)$$

Друга половина граничних умов (6) після диференціювання рівнянь (8) та (10) дозволяє записати

$$E_1S_1\frac{A}{c_1}\left[\cos\frac{\omega}{c_1}a_2 tg\frac{\omega}{c_1}(a_1+a_2) - \sin\frac{\omega}{c_1}a_2\right] = E_2S_2\frac{D}{c_2}\cos\frac{\omega}{c_2}a_2, \quad (12)$$

Спільне розв'язання рівнянь (11) та (12) дозволяє отримати вираз

$$\frac{E_1S_1c_2}{E_2S_2c_1} = \frac{ctg\frac{\omega}{c_2}a_2\left[\cos\frac{\omega}{c_1}a_2 + \sin\frac{\omega}{c_1}a_2 tg\frac{\omega}{c_1}(a_1+a_2)\right]}{\cos\frac{\omega}{c_1}a_2 tg\frac{\omega}{c_1}(a_1+a_2) - \sin\frac{\omega}{c_1}a_2} \quad (13)$$

Розв'язання рівняння (13) відносно a_1 дозволяє отримати формулу для розрахунку товщини узгоджувальної накладки

$$a_1 = \frac{c_1}{\omega}arctg\ \frac{E_2S_2c_1ctg\ \frac{\omega}{c_2}a_2 + E_1S_1c_2tg\ \frac{\omega}{c_1}a_2}{E_1S_1c_2 - E_2S_2c_1ctg\ \frac{\omega}{c_2}a_2 tg\ \frac{\omega}{c_1}a_2} - a_2 \quad (14)$$

Якщо випромінююча та демпфуюча накладки виконані з однакового матеріалу і мають однаковий діаметр, отримаємо $a_1 = a_1^{/}$.

В цьому випадку п'єзоелектричний перетворювач буде випромінювати однакові за параметрами коливання з обох своїх торців.

В п'єзоелектричних напівхвильових перетворювачах зазвичай роблять з різного матеріалу, намагаючись виконати умову $\rho_1c_1 \succ \rho_3c_3$, де ρ_1 та ρ_3 - щільність матеріалу накладок; c_3 - швидкість звуку в матеріалі випромінюючої накладки. В цьому випадку торець випромінюючої накладки буде коливатися з більшою амплітудою ніж торець демпфуючої накладки, а для визначення товщини $a_1^{/}$ випромінюючої накладки необхідно знову скористатися формулою (14), змінивши в ній величини E_1, c_1 відповідно на E_3, c_3.

Ультразвукові приводи випромінювачі закріплюються на дні лотка у точці максимальної амплітуди коливань, тобто торцевою поверхнею випромінюючої накладки. Якщо донна поверхня лотка виконана з тонкого металу і відіграє роль гнучкої мембрани, взаємний вплив між приводами відсутній, що дозволяє вибирати відстань між приводами із конструктивної доцільності.

В іншому випадку, при виконанні лотка жорстким з застосуванням товстого металу довжина і ширина лотка повинні бути кратними парній кількості чвертей довжини хвилі згинних коливань в донній поверхні, а приводи повинні розміщуватися в вузлових точках стоячої хвилі деформації (рис. 2).

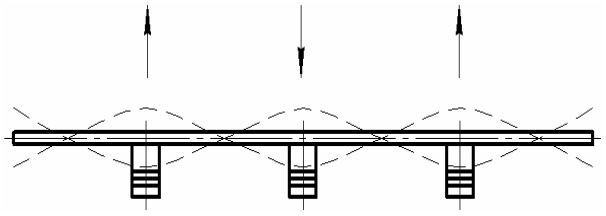

Рис. 2. Схема розташування приводів-випромінювачів на жорсткій донній поверхні

При цьому необхідно враховувати і протифазність підключення приводів, що розміщуються в сусідніх вузлових точках. При такому розміщенні приводів-випромінювачів вдається уникнути їх взаємного впливу і забезпечити збудження ефективних резонансних коливань усієї донної поверхні. Суттєве збільшення поверхні випромінювання дозволяє підвести до поверхні більшу потужність і забезпечити виконання умов узгодження навантаження.

Для отримання максимальної ефективності коливань донної поверхні необхідно забезпечити зменшення площі контакту приводів з поверхнею. В ідеалі контакт бажано звести до точкового. Для цього необхідно застосувати трансформатори швидкості, які дозволяють зменшити площу випромінюючого торця і збільшити амплітуду його коливань.

Трансформатори швидкості або ультразвукові концентратори забезпечують, завдяки зміні за певним законом площі перерізу, збільшення коливальної швидкості часток матеріалу трансформатора. Найбільш технологічним і поширеним в застосуванні є ступінчастий трансформатор швидкості, коефіцієнт трансформації якого дорівнює

$$K = \frac{D}{d},$$

де D - діаметр ступеню великої площі;

d - діаметр ступеню малої площі.

Розрахунок привода з трансформатором швидкості починається з визначення резонансної частоти дна лотка. На цю частоту необхідно налаштувати усі приводи.

В разі застосування напівхвильової акустичної схеми привода (рис. 3) вдається забезпечити суттєве зменшення габаритів та ваги технологічного обладнання.

Для такої системи у випадку здійснення гармонійних коливань розв'язки загального рівняння (1) поздовжніх коливань можуть бути записані як

$$\xi_1(x,t) = \left(A\cos\frac{\omega}{c_1}x + B\sin\frac{\omega}{c_1}x \right)\sin(\omega t + \varphi); \quad (15)$$

$$\xi_2(x,t) = \left(C\cos\frac{\omega}{c_2}x + D\sin\frac{\omega}{c_2}x \right)\sin(\omega t + \varphi); \quad (16)$$

$$\xi_3(x,t) = \left(Q\cos\frac{\omega}{c_3}x + G\sin\frac{\omega}{c_3}x \right)\sin(\omega t + \varphi). \quad (17)$$

Граничні умови для коливальної системи згідно розрахункової схеми (рис. 3) можна представити як:

$$\xi_3 = 0 \quad \text{при} \quad x = -a_3; \quad (18)$$

$$\left.\begin{aligned} \xi_2 &= \xi_3 \\ E_2 S_2 \frac{\partial \xi_2}{\partial x} &= E_3 S_1 \frac{\partial \xi_3}{\partial x} \end{aligned}\right\} \quad \text{при} \quad x = 0; \quad (19)$$

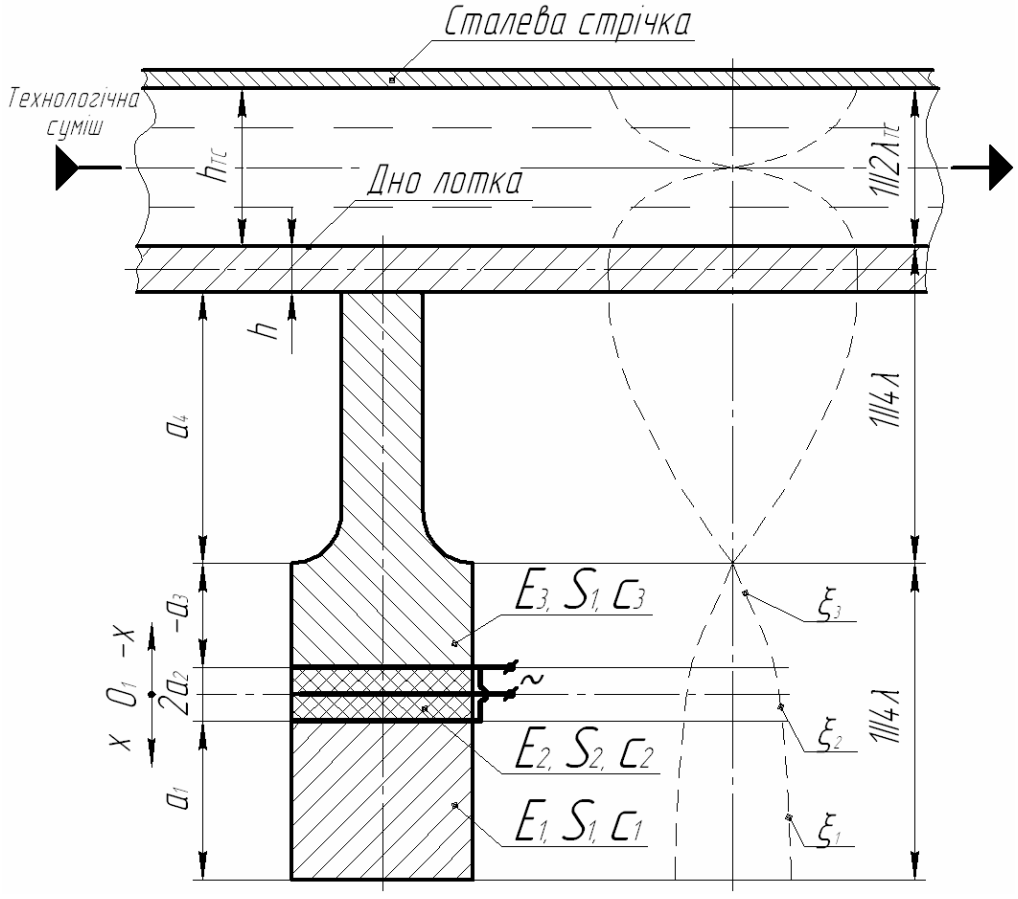

Рис. 3. Розрахункова схема акустичної системи технологічного обладнання на базі відкритого лотка з напівхвильовими резонансними приводами, оснащеними ступінчастими трансформаторами швидкості

$$\left.\begin{aligned}\xi_2 &= \xi_1 \\ E_2 S_2 \frac{\partial \xi_2}{\partial x} &= E_1 S_1 \frac{\partial \xi_1}{\partial x}\end{aligned}\right\} \text{ при } x = 2a_2 ; \quad (20)$$

$$\frac{\partial \xi_1}{\partial x} = 0 \text{ при } x = a_1 + 2a_2 \quad (21)$$

Врахування умови (18) дозволяє з рівняння (17) отримати

$$Q\cos\frac{\omega}{c_3}a_3 = G\sin\frac{\omega}{c_3}a_1$$

$$Q = Gtg\frac{\omega}{c_3}a_3$$

або . (22)

Тоді, рівняння (17) прийме вигляд

$$\xi_3(x,t) = G\left(\sin\frac{\omega}{c_3}x + tg\frac{\omega}{c_3}a_3\cos\frac{\omega}{c_3}x\right)\sin(\omega t + \varphi) \quad (23)$$

Перша половина граничної умови (19) дозволяє з рівнянь (16) та (23) отримати

$$C = Gtg\frac{\omega}{c_3}a_3 , \quad (24)$$

Друга половина умови (19) після диференціювання рівнянь (16) та (23) дає можливість записати

$$E_2 S_2 \frac{D}{c_2} = E_3 S_1 \frac{G}{c_3}$$

$$\frac{D}{G} = \frac{E_3}{E_2}\frac{S_1 c_2}{S_2 c_3} \quad (25)$$

або ,

Тоді, спільне розв'язання рівнянь (24) та (25) дозволяє отримати

$$\frac{D}{C} = \frac{E_3}{E_2}\frac{S_1 c_2}{S_2 c_3 tg\frac{\omega}{c_3}a_3} , \quad (26)$$

Гранична умова (21) дозволяє привести рівняння (15) до вигляду

$$B = Atg\frac{\omega}{c_1}(a_1 + 2a_2) , \quad (27)$$

З врахуванням (27) рівняння (15) перепишемо у вигляді

$$\xi_1(x,t) = A\left[\cos\frac{\omega}{c_1}x + tg\frac{\omega}{c_1}(a_1 + 2a_2)\sin\frac{\omega}{c_1}x\right]\sin(\omega t + \varphi) \quad (28)$$

Врахування першої половини умови (20) приводить рівняння (16) та (28) до вигляду

$$C\left(\cos\frac{\omega}{c_2}2a_2 + \frac{D}{C}\sin\frac{\omega}{c_2}2a_2\right) = A\left[\cos\frac{\omega}{c_1}2a_2 + tg\frac{\omega}{c_1}(a_1 + 2a_2)\sin\frac{\omega}{c_1}2a_2\right] \quad (29)$$

Друга половина граничної умови (20) дозволяє після диференціювання записати рівняння в наступному вигляді

$$C\left(\frac{D}{C}\cos\frac{\omega}{c_2}2a_2 - \sin\frac{\omega}{c_2}2a_2\right) = A\frac{E_1 S_1 c_2}{E_2 S_2 c_1}\left[tg\frac{\omega}{c_1}(a_1 + 2a_2)\cos\frac{\omega}{c_1}2a_2 - \sin\frac{\omega}{c_1}2a_2\right] . \quad 30)$$

Ділення виразів (29) та (30) та врахування співвідношення (26) дає можливість отримати:

$$a_3 = \frac{c_3}{\omega}arctg\frac{E_3 S_1 c_2\left(Z\cos\frac{\omega}{c_2}2a_2 - \sin\frac{\omega}{c_2}2a_2\right)}{E_2 S_2 c_3\left(Z\sin\frac{\omega}{c_2}2a_2 + \cos\frac{\omega}{c_2}2a_2\right)} , \quad (31)$$

де

$$Z = \frac{E_2 S_2 c_1\left[\cos\frac{\omega}{c_1}2a_2 + tg\frac{\omega}{c_1}(a_1 + 2a_2)\sin\frac{\omega}{c_1}2a_2\right]}{E_1 S_1 c_2\left[tg\frac{\omega}{c_1}(a_1 + 2a_2)\cos\frac{\omega}{c_1}2a_2 - \sin\frac{\omega}{c_1}2a_2\right]}$$

Для визначення поздовжнього розміру a_3 за формулою (31) необхідно задатися бажаними товщиною та матеріалом демпфуючої накладки та вибрати типорозмір п'єзокерамічних кілець.

Довжину ступеню малої площі трансформатора швидкості (рис. 3) за умови виготовлення його з матеріалу, однакового з матеріалом дна лотка, можна вирахувати із залежності

$$a_4 = \frac{1}{4}\left(\frac{c_3}{f} - h\right) , \quad (32)$$

де h - товщина дна проточного лотка.

Товщина шару технологічної суміші в лотку вираховується згідно залежності

$$h_{mc} = \frac{1}{2}\frac{c_{mc}}{f} , \quad (33)$$

де c_{mc} - швидкість звуку в технологічній суміші.

У випадку застосування в технологічному обладнанні ультразвукової кавітаційної камери

у вигляді двох коаксіально розміщених труб і розташуванні резонансних приводів на твірній поверхні зовнішньої труби розрахунок розмірів елементів акустичної системи відбувається аналогічно по наведеним вище залежностям. При цьому, для розрахунку резонансної частоти зовнішньої труби слід скористатися залежністю [2]

$$f = \frac{1}{2\pi}\frac{c_3}{r_{сер}}\sqrt{1+i^2}\,.$$

де i - кількість радіально-згинних хвиль в перерізі трубі; $r_{сер}$ - середній радіус труби.

При збудженні резонансних приводів, розміщених в пучностях згідно схеми (рис.4), слід враховувати фазність підключення приводів до електричного генератора коливань.

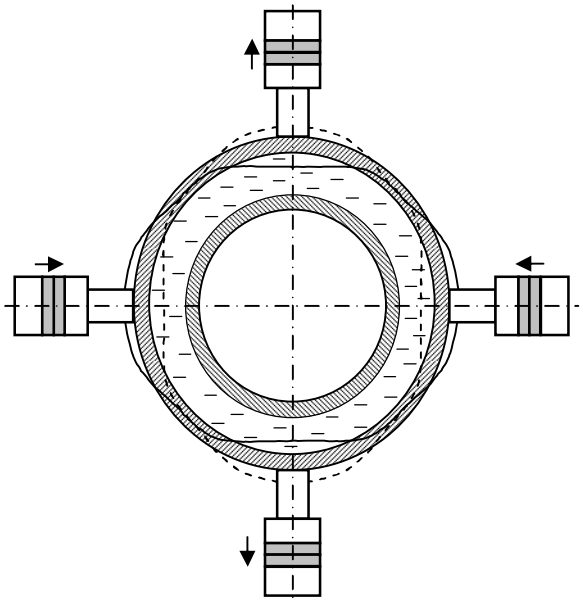

Рис. 4. Схема розташування резонансних приводів по перерізу труби з врахуванням фазності їх підключення

Відстань здовж труби між окремими секціями приводів, встановленими в пучностях поздовжньо-згинної хвилі, може бути визначена згідно методики, викладеної в роботі [1].

Висновки

1. Запропонована методика розрахунку дозволяє визначити основні розміри акустичної системи ультразвукового технологічного обладнання, виконаного у вигляді відкритого проточного плоского лотка або у вигляді циліндричної щілини між двома коаксіально розміщеними трубами, що використовується в процесі гідролізу-екстракції пектину.

2. Методика розрахунку дозволяє забезпечити ефективне введення в шар технологічної суміші ультразвукових коливань за рахунок узгодження резонансних коливань окремих складових частин технологічного обладнання, усуненню взаємного впливу окремих приводів-випромінювачів та врахуванню необхідних міцностних та акустичних характеристик матеріалів, що застосовуються.

3. Запропонована методика апробована на значній кількості різноманітних за конструктивною реалізацією технологічних ультразвукових кавітаційних апаратів, працездатність та ефективність яких підтверджує її достовірність.

Література

1. Луговской А.Ф., Чухраев Н.В. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях.- К.: Видавничо-поліграфічний центр “Київський університет”, 2007.-244 с.

2. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле / Пер. с англ. Л.Г Корнейчука / Под ред. Э.И.Григолюка.- М.: Машиностроение, 1985.- 424 с.