УДК 66.066

І. В. Севостьянов
Вінницький національний технічний університет

ВІБРОУДАРНЕ ЗНЕВОДНЕННЯ ВІДХОДІВ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

У статті наводиться схема гідроімпульсної установки для віброударного зневоднення відходів харчових виробництв (спиртової барди, пивної дробини, бурякового жому, кавового шламу), що дозволяє здійснювати їх ефективну утилізацію. Розглядається механізм процесів віброударного зневоднення відходів у прес-формі, наводяться рівняння для розрахунку зміни тиску у середовищі відходів, від якого залежіть продуктивність робочого процесу.

***Ключові слова**: віброударне зневоднення, відходи харчових виробництв, гідроімпульсна установка.*

И. В. Севостьянов

ВИБРОУДАРНОЕ ОБЕЗВОЖИВАНИЕ ОТХОДОВ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ.

В статье приводится схема гидроимпульсной установки для виброударного обезвоживания отходов пищевых производств (спиртовой барды, пивной дробины, свекольного жома, кофейного шлама), позволяющая осуществлять их эффективную утилизацию. Рассматривается механизм процессов виброударного обезвоживания отходов в пресс-форме, приводятся уравнения для расчета изменения давления в среде отходов, от которого зависит производительность рабочего процесса.

***Ключевые слова:** виброударное обезвоживание, отходы пищевых производств, гидроимпульсная установка.*

I.V. Sevostyanov

VIBRO-BLOWING DEHYDRATION OF A WASTE OF FOOD MANUFACTURES.

The scheme of hydraulic pulse installation for vibro-blowing dehydration of a waste of food manufactures (spirit bards, a beer pellet, beet press, coffee slime), allowing to carry out their effective recycling, is presented in this article. The mechanism of processes vibro-blowing dehydration of a waste in a compression mould is considered, the equations for calculation of pressures change in the environment of a waste on that productivity of working process depends are resulted.

***Keywords:** vibro-blowing dehydration, a waste of food manufactures, hydraulic pulse installation.*

Віброударне зневоднення є одним з найбільш ефективних способів видалення рідини з відходів харчових виробництв (спиртової барди, пивної дробини, бурякового жому, кавового та ячмінного шламу), що дозволяє використовувати їх як цінну високопоживну добавку до сільськогосподарських кормів або в якості палива [1]. Так, при реалізації віброударного зневоднення спиртової барди, бурякового жому та кавового шламу на дослідному гідроімпульсному стенді їх кінцева вологість $U_к$ не перевищувала 20 – 24% [2]. Для порівняння: при здійсненні статичного пресування цих самих відходів на шнекових пресах та декантерних центрифугах їх кінцева вологість не нижча 30 – 76%, що змушує перед використанням відходів в якості корму або палива здійснювати їх додаткове сушіння. Останнє призводить до суттєвого підвищення загальної енергоємності процесу зневоднення, оскільки навіть у випадку застосуванні найбільш економічних вакуумних сушарок витрати енергії складають порядку 740 – 760 кВт/т, тоді як при віброударному зневодненні вони не більші 90 кВт/т [2]. Хімічні та біологічні способи зневоднення порівняно малопродуктивні (тривалість фазового розділення з їх допомогою порції відходів – від 10 до 40 год), а обладнання для реалізації цих способів дуже громіздке і дороге [1, 2].

Для широкого впровадження віброударного зневоднення на виробництві потрібно розробити схеми високоефективного промислового обладнання, на якому здійснюється пропонований спосіб. Крім цього, необхідно отримати залежності для визначення основних робочих параметрів процесу (в тому числі, зміни тиску у середовищі відходів під час їх віброударного зневоднення), що дозволить у подальшому вибирати найбільш раціональний режим його реалізації. Вказані завдання розв’язуються у даній роботі.

На рис. 1 представлена спрощена конструктивна схема технологічного комплексу для зневоднення відходів харчових виробництв в складі шнекового преса та гідроімпульсної вібропресової установки. Шнековий прес, закріплений на рамі 7 містить планетарний мотор-редуктор 1, що через пружну муфту 2 приводить в обертання шнек 3, розташований у внутрішньому циліндрі 4. У станках останнього виконане велике число дрібних наскрізних отворів (на схемі не показані), закритих з середини фільтрувальною сіткою. Внутрішній циліндр 4 установлений в середині зовнішнього циліндра 5 порожнина якого за допомогою трубки 29

© І. В. Севостьянов

пов'язана з баком 16. В свою чергу, циліндр 4 сполучається через гофрований гумовотканинний рукав 6 з прес-формою гідроімпульсної вібропресової установки, що складається з днища 25 та двох бокових стінок 31, у яких виконані наскрізні дрібні отвори 22, 30, закриті з середини фільтрувальною сіткою. Днище 25 жорстко пов'язане із плунжером гідроциліндра 27 гідроімпульсного привода (ГІП) [3]. Гідроциліндр змонтовано на верхній поперечині 14 станини установки, що включає також колони 12 й нижню поперечину 13, установлену на віброопорах. Прес-форма пружно пов'язана із поперечиною 14 за допомогою чотирьох пружин 15, якими у вихідному положенні підтискається до запліччя поперечини та до чотирьох упорів 20. Пуансон 10 з виступами 21 на нижній поверхні утримується над днищем 25 чотирма пружинами 18, що спираються на планки 19, жорстко прикріплені до стінок 31. З пружинами 18 пуансон зв'язують прикріплені до нього планки 24, що навантажені інерційними масами 8, одягнутими на штифти 9.

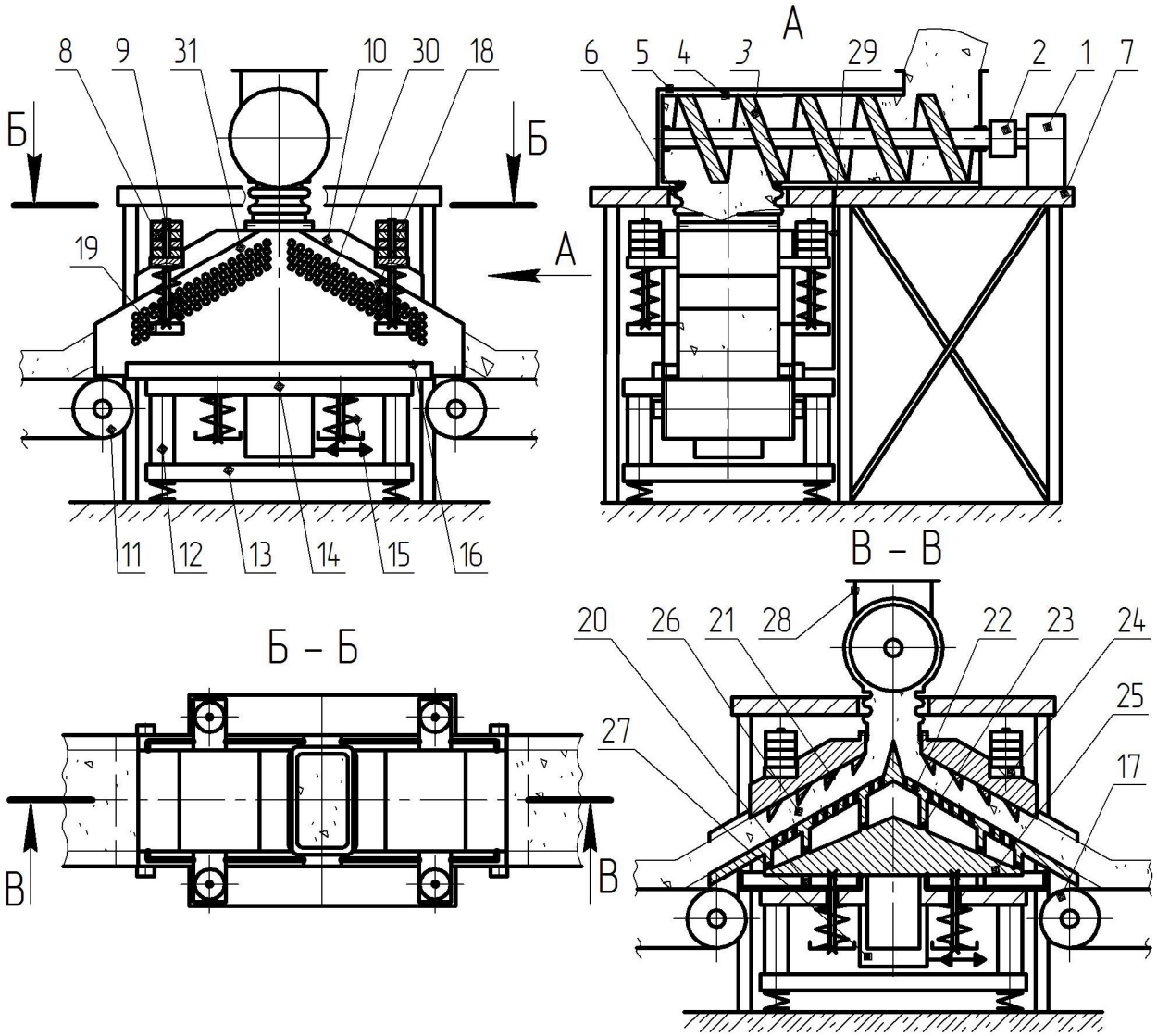

Рис. 1. **Спрощена конструктивна схема технологічного комплексу для зневоднення відходів харчових виробництв**

Працює технологічний комплекс таким чином. Відходи харчових виробництв з початковою вологістю $U_п$ = 90 – 95% подаються безперервним потоком через патрубок 28 у шнековий прес, шнек 3 якого обертається, стискаючи відходи у внутрішньому циліндрі 4. Видалена з них рідина стікає через фільтрувальну сітку, що затримує тверді частинки відходів. Далі рідина проходить через отвори у циліндрі 4, збирається у зовнішньому циліндрі 5 й по трубці 29 відводиться у бак 16. Попередньо зневоднена до вологості 70 – 75% тверда фаза відходів витискається з циліндра 4 і через гумовотканинний рукав 6 подається у прес-форму гідроімпульсної вібропресової установки, у порожнину між днищем 25, пуансоном 10 та боковими стінками 31. Відходи безперервно переміщуються уздовж цієї порожнини (див. розріз В – В на рис. 1) до стрічкових конвеєрів 11, 17. У порожнині гідроциліндра 27 гідроімпульсного привода періодично змінюється тиск робочої

рідини в діапазоні від 4 до 11 МПа. Так, при збільшенні тиску плунжер гідроциліндра 27 й разом з ним прес-форма з відходами 26 всередині швидко піднімаються вверх з прискоренням, що дорівнює (8 ÷ 10)g [3]. При цьому стискаються пружини 15, а відходи 26 піддаються інерційному навантаженню, що створює пуансон 10 з інерційними масами 8. Під час різкого падіння тиску робочої рідини у порожнині гідроциліндра 27 прес-форма з відходами 26 та пуансон 10 з масами 8 під дією сили власного тяжіння та сили пружності стиснених пружин 15 опускаються у вихідне нижнє положення з ударом днища 25 наприкінці ходу об запліччя поперечини 14 та об упори 20. Даний ударний імпульс передається нижнім шарам відходів 26. Одночасно їх верхні шари стискаються підпружиненим відносно прес-форми пуансоном 10. Таким чином, при повторенні описаного циклу прес-форма та пуансон здійснюють вертикальні зворотно-поступальні переміщення з частотою ν до 60 Гц і амплітудою а до 2,5 мм, внаслідок чого відходи 26, які переміщуються від рукава 6 до конвеєрів 11, 17 піддаються віброударному інерційному навантаженню, що сприяє інтенсивному видаленню з них рідкої фази. Остання проходить через отвори 22, 30, закриті з середини фільтрувальною сіткою й стікає по отворах 23 та по стінках 31 у бак 16, звідки йде на фільтрування. Зневоднена у прес-формі до вологості 25 – 30% тверда фаза відходів скидається на конвеєри 11, 17.

Перевагами даної схеми установки для віброударного зневоднення відходів у порівнянні із схемами пропонованими раніше [2] є простота конструкції, надійність, забезпечення безперервності робочого процесу, а також те, що при використанні установки практично усувається ймовірність забивання прес-форми твердою фазою відходів, що зневоднюються. Крім цього, під час проектування креслень установки може бути використано багато добре відпрацьованих й перевірених на практиці конструкцій вузлів іншого вібропресового обладнання [3].

Розглянемо цикл віброударного навантаження відходів харчових виробництв у прес-формі на гідроімпульсній установці (див. рис. 1). На рис. 2 представлені осцилограми зміни тиску $p_г$ робочої рідини у гідроциліндрі ГІП з віброзбуджувачем «на вході» [3] та переміщення z_I вібростолу експериментального гідроімпульсного стенда-прототипу установки при віброударному зневодненні на ньому порції концентрату кавового шламу.

На І-му етапі навантаження відходів при збільшенні $p_г$ від мінімального – $p_{г.min}$ до максимального – $p_{г.max}$ значення (див. рис. 2, а) відбувається швидке переміщення прес-форми з відходами з вихідного у верхнє положення, що характеризуються координатами z_{Imin}, z_{Imax} (див. рис. 2, б). Одночасно має місце переміщення пуансона z_{II}, але внаслідок пружної деформації відходів під впливом сили інерції пуансона і інерційних мас, величина z_{II} у будь-який момент часу І-го етапу буде меншою за z_I. Поточні значення z_I та z_{II} на даному етапі визначаємо за допомогою диференціальних рівнянь руху

$$m_I(\ddot{z}_I + g) = p_{г.max}S_г - \dot{z}_I(\alpha_I + \alpha_в) - c_д(z_{0д} + z_I) - c_п(z_{0п} + z_I) - c_в z_I - R_I; \quad (1)$$

$$m_{II}(\ddot{z}_{II} + g) = c_п(z_{0п} + z_I - z_{II}) + c_в(z_I - z_{II}) - \dot{z}_{II}\alpha_в; \;\; 0 \le t \le t_I, \quad (2)$$

де m_I – маса нижнього виконавчого елемента установки (включає маси плунжера гідроциліндра 27, днища 25, стінок 31, порції відходів 26 та планок 19 – див. рис. 1); m_{II} – маса верхнього виконавчого елемента установки (включає маси пуансона 10, штифтів 9 та планок 24, а також інерційні маси 8); $S_г$ – площа поперечного перерізу плунжера гідроциліндра 27; α_I, $\alpha_в$ – коефіцієнти в'язкого демпфірування при переміщенні плунжера гідроциліндра 27 та твердих частинок відходів у прес-формі [2]; $c_д$, $c_п$ – коефіцієнти жорсткості пружин, що пов'язані з днищем 25 та з пуансоном 10; $c_в$ – коефіцієнт жорсткості під час пружного деформування відходів 26; $z_{0д}$, $z_{0п}$ – попереднє стискання пружин, що пов'язані з днищем 25 та з пуансоном 10; R_I – сила сухого тертя в ущільненнях плунжера гідроциліндра 27 (може бути визначена за методикою [4]); t_I – тривалість І-го етапу циклу навантаження, що відповідає тривалості відкриття t_o віброзбуджувача ГІП установки, приєднаного за схемою «на вході» [2, 3].

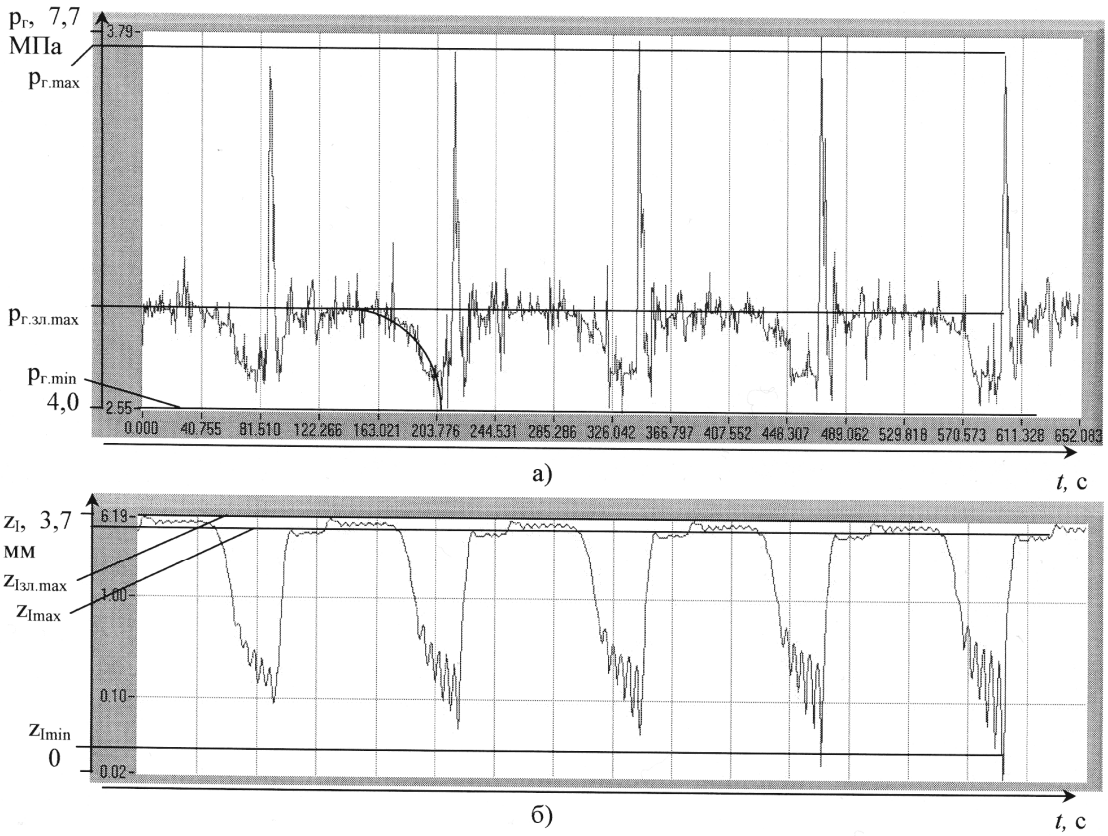

Рис. 2. **Осцилограми зміни: а – тиску $p_г$ робочої рідини у гідроциліндрі ГІП; б – переміщення z_I вібростолу експериментального гідроімпульсного стенда при віброударному зневодненні на ньому порції концентрату кавового шламу**

На ІІ-му етапі навантаження відходів у прес-формі тиск $p_г$ спочатку падає від $p_{г.max}$ до $p_{г.min}$, а далі дещо піднімається до $p_{г.зл.max}$ (див. рис. 2, а), що обумовлено, на нашу думку, ударно-хвильовими процесами у зливній гідролінії ГІП [2, 5]. Завдяки цьому вібростіл стенду-прототипу у продовж практично всього розглядуваного етапу утримується засиллям, створюваним тиском робочої рідини $p_{г.зл.max}$ у верхньому граничному положенні з координатою $z_{Iзл.max}$ (див. рис. 2, б), здійснюючи лише незначні за амплітудою коливання згідно із синусоїдальним законом. Оскільки амплітуда цих коливань складає біля 1% від величини $z_{Iзл.max}$, їх можна не брати до уваги і з метою спрощення аналізу вважати, що на ІІ-му етапі прес-форма, а отже й верхній виконавчий елемент стенду є нерухомими:

$$z_I(t) = z_I(t_I);\ \ z_{II}(t) = z_{II}(t_I);\ t_I < t \le t_{II}, \tag{3}$$

де t_{II} – тривалість ІІ-го етапу (див. нижче).

На ІІІ-му етапі в результаті затухання ударно-хвильових процесів у зливній гідролінії ГІП тиск $p_г$ зменшується від $p_{г.зл.max}$ до $p_{г.min}$ (див. рис. 2, а), таким чином, вібростіл повертається у вихідне положення (координата z_{Imin} – див. рис. 2, б). Змоделювати зміну $p_г$ на розглядуваному етапі достатньо складно, тому можна з достатньо високою точністю описати її за допомогою емпіричної формули (рівняння еліпса), складеної за відповідною ділянкою осцилограми (див. рис. 2, а). Апроксимована залежність $p_г$ на ІІІ-му етапі показана на осцилограмі тонкою плавною кривою

$$p_г(t) = \sqrt{1 - \frac{(t - 0{,}063)^2}{0{,}063^2}} + 4;\ \ t_{II} < t \le t_{III}, \tag{4}$$

де t_{III} – тривалість ІІІ-го етапу за осцилограмою на рис. 2, б приблизно дорівнює однієї третині періоду $T_ц$ циклу віброударного навантаження. Тобто

$$t_{III} = \frac{1}{3}T_ц = \frac{1}{3\cdot\nu}, \tag{5}$$

де ν – частота циклів навантаження. Тоді тривалість II-го етапу циклу

$$t_{II} = T_ц - t_I - t_{III} = \frac{1}{\nu} - t_о - \frac{1}{3\cdot\nu}.$$

На практиці для отримання залежності для розрахунку $p_г(t)$ на будь якому іншому режимі роботи установки для зневоднення відходів достатньо зняти на цьому режимі на стенді-прототипі осцилограму $p_г(t)$ і скласти за нею для III-го етапу робочого циклу відповідну емпіричну формулу (як показали проведені нами численні дослідження зі зневоднення на стенді-прототипі різних відходів, їх вид не впливає на характер залежності $p_г(t)$ [2]).

Рівняння руху виконавчих елементів установки на III-му етапі мають вигляд

$$\begin{aligned} m_I(\ddot{z}_I + g) = p_г(t)\cdot S_г + \dot{z}_I(\alpha_I + \alpha_в) - c_д(z_{0д} + z_{Imax} - z_I) - \\ - c_п(z_{0п} + z_{Imax} - z_{IImax} - z_I) - c_в(z_{Imax} - z_I) + R_I; \end{aligned} \quad t_{II} < t \le t_{III}; \tag{6}$$

$$m_{II}(\ddot{z}_{II} + g) = c_п(z_{0п} + z_{Imax} - z_I + z_{II}) + c_в(z_{Imax} - z_{IImax} - z_I + z_{II}) - \dot{z}_{II}\alpha_в, \tag{7}$$

де z_{Imax} та z_{IImax} визначаються за рівняннями (1, 2) для моменту часу $t = t_I$.

Тепер розглянемо, як буде змінюватись тиск у середовищі відходів під час їх віброударного зневоднення на гідроімпульсній установці на різних етапах циклу спрацьовування ГІП та на різних ділянках прес-форми.

На I-му етапі циклу при переміщенні прес-форми вверх стискатись будуть в основному ділянки відходів, що прилягають до днища 1 та до пуансона 2 (рис. 3). Товщини нижнього – $h_{нI}$ та верхнього – $h_{вII}$ стиснених шарів на даному етапі будуть відповідати переміщенням днища – z_I та пуансона z_{II}, тобто

$$h_{нI}(t) = z_I(t)\cdot\cos\gamma;\ \ h_{вI}(t) = (z_I(t) - z_{II}(t))\cdot\cos\gamma;\ 0 \le t \le t_I, \tag{8}$$

де γ – кут нахилу верхньої робочої поверхні днища 1 (рис. 3).

Тиски у нижньому – $p_{в.нI}$ та у верхньому – $p_{в.вII}$ стиснених шарах визначаємо з використанням відповідних рівнянь руху (1, 2)

$$p_{в.нI}(t) = \frac{p_{г.max}S_г - m_I(\ddot{z}_I + g) - \dot{z}_I(\alpha_I + \alpha_в) - c_д(z_{0д} + z_I) - c_п(z_{0п} + z_I) - c_в z_I - R_I}{S_д}; \tag{9}$$

$$p_{в.вI}(t) = \frac{c_п(z_{0п} + z_I - z_{II}) + c_в(z_I - z_{II}) - \dot{z}_{II}\alpha_в - m_{II}(\ddot{z}_{II} + g)}{S_п};\ \ 0 \le t \le t_I, \tag{10}$$

де $S_д$, $S_п$ – площі верхньої поверхні днища та нижньої поверхні пуансона (при визначенні $S_д$ від добутку довжини $L_д$ й $B_п$ ширини даної поверхні слід відняти площу поперечного перерізу всіх виконаних у днищі отворів 3: $S_д = L_д B_п - S_{oΣ}$); площа визначається як $S_п = L_{п2} B_п$.

Тиск у середніх шарах відходів у прес-формі – $p_{в.сI}(t)$ буде залежати в основному від сили інерції пуансона 2 з інерційними масами 4 та від сили пружності, створюваної пружинами, що зв'язують пуансон з прес-формою (див. також рис. 1)

$$p_{в.сI}(t) = \frac{m_{II}g - c_п z_{0п}}{S_п};\ 0 \le t \le t_I, \tag{11}$$

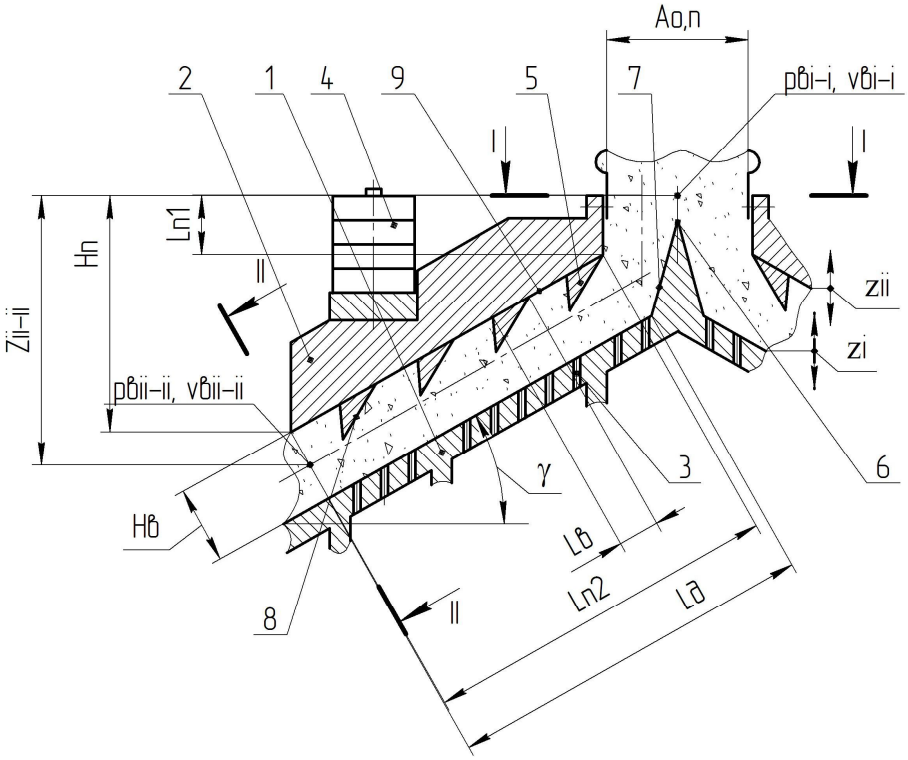

Рис. 3. **Схема навантаження та руху відходів у прес-формі установки для віброударного зневоднення**

тоді як зміну товщини даного середнього шару у продовж I-го етапу знаходимо як

$$h_{cI}(t) = H_в - h_{нI}(t) - h_{вI}(t);\ 0 \le t \le t_I, \tag{12}$$

де $H_в$ – початкова товщина шару відходів у прес-формі.

На II-му етапі циклу при практично нерухомих пуансоні та прес-формі відходи у останній піддаються в основному статичному навантаженню, створюваного силою тяжіння пуансона 2 з інерційними масами 4, а також силою пружності стиснених пружин. Підвищений тиск $p_{в.нI}(t)$, $p_{в.вI}(t)$ створений на попередньому етапі у нижніх та верхніх шарах прес-форми в результаті переміщень днища та пуансона, на II-му етапі поширюється хвилями у середніх шарах [2]. Відбувається рівномірне перерозподілення твердих частинок відходів у прес-формі з їх більш щільним укладанням та витисканням з проміжків між ними рідини, яка в решті решт витискається з прес-форми [2, 3]. Але вказані коливання твердих частинок досить швидко затухають, тому можна з високим ступенем наближення вважати, що тиск $p_{вII}(t)$ у середовищі відходів у прес-форми на розглядуваному етапі є приблизно однаковим по її висоті й рівним

$$p_{вII}(t) = \frac{m_{II}g + c_п\left(z_{0п} + z_{Imax} - z_{IImax}\right) - c_в\left(z_{Imax} - z_{IImax}\right)}{S_п};\ t_{II} < t \le t_{III}. \tag{13}$$

На III-му етапі циклу віброударного зневоднення виконавчі елементи установки рухаються вниз. При цьому у верхніх шарах відходів у прес-формі, що прилягають до пуансона та в їх нижніх шарах, які контактують із днищем, виникатиме розрідження. Внаслідок того, що швидкості переміщення виконавчих елементів у вихідні нижні положення є меншими, ніж швидкості їх переміщення вверх на I-му етапі (див. рис. 2, б), тиск $p_{в.cIII}(t)$ у середніх шарах буде також встигати змінюватись. Останнє обумовлене збільшенням об’єму, що займають відходи у прес-формі [2, 5]. Хвилі тиску $p_{в.cIII}(t)$, що вирівнює будуть відходити від верхньої і нижньої меж середнього шару відходів у прес-формі в напрямках до пуансона 2 та до днища 1. Швидкості переміщення вказаних хвиль буде приблизно відповідати швидкості руху виконавчих елементів установки. Таким чином, з врахуванням рівнянь (6, 7), залежності для визначення тиску у нижніх – $p_{в.нIII}(t)$, середніх – $p_{в.cIII}(t)$ та верхніх – $p_{в.вIII}(t)$ шарах відходів у прес-формі на III-му етапі циклу, матимуть вигляд

$$p_{в.нIII}(t)=\left[\begin{array}{c} p_г(t)\cdot S_г+\dot{z}_I(\alpha_I+\alpha_в)-m_I(\ddot{z}_I+g)-c_д(z_{0д}+z_{Imax}-z_I)- \\ \\ -c_п(z_{0п}+z_{Imax}-z_{IImax}-z_I)-c_в(z_{Imax}-z_I)+R_I \end{array}\right]\Bigg/S_д;\ \ t_{II}<t\le t_{III}; \quad (14)$$

$$p_{в.cIII}(t)=p_{вII}(t)-\frac{\Delta V_{вIII}K_в}{V_{вII}}=p_{вII}(t)-\frac{\left[z_I(t)\cdot B_п L_д\cos\gamma+\left(z_I(t)-z_{II}(t)\right)\cdot B_п L_{п2}\cos\gamma\right]K_в}{H_в-h_{нImax}-h_{вImax}}=$$

$$=p_{вII}(t)-\frac{\left[z_I(t)\cdot L_д+\left(z_I(t)-z_{II}(t)\right)\cdot L_{п2}\right]B_п K_в\cos\gamma}{H_в-\left[z_{Imax}\cdot L_д+\left(z_{Imax}-z_{IImax}\right)\cdot L_{п2}\right]B_п\cos\gamma}=p_{вII}(t)-\frac{\left[z_I(t)\cdot L_д+\left(z_I(t)-z_{II}(t)\right)\cdot L_{п2}\right]K_в}{H_в-\left[z_{Imax}\cdot L_д+\left(z_{Imax}-z_{IImax}\right)\cdot L_{п2}\right]}; \quad (15)$$

$$p_{в.вIII}(t)=\frac{c_п\left(z_{0п}+z_{Imax}-z_I+z_{II}\right)+c_в\left(z_{Imax}-z_{IImax}-z_I+z_{II}\right)-\dot{z}_{II}\alpha_в-m_{II}\left(\ddot{z}_{II}+g\right)}{S_п}, \quad (16)$$

де $\Delta V_{вIII}$ – зміна робочого об'єму прес-форми на III-му етапі; $V_{вII}$ – робочий об'єм прес-форми на II-му етапі; $K_в$ – модуль об'ємної пружності відходів [2, 5].

Розрідження $p_{в.вIII}(t)$, $p_{в.нIII}(t)$ (див. формули 14, 16), на нашу думку, виникатимуть на даному етапі тільки у мінімальних за товщиною шарах відходів у прес-формі, що безпосередньо прилягають до робочих поверхонь днища 1 та пуансона 2. В основному ж об'ємі прес-форми на III-му етапі тиск буде дорівнювати $p_{в.cIII}(t)$ (див. формулу 15).

Також під час віброударного зневоднення відходів тиск в їх середовищі створюється завдяки опору при рівномірному переміщенні відходів від входу у прес-форму до виходу з неї. Дане переміщення забезпечується шнековим пресом, а опір переміщенню створюється за рахунок внутрішнього тертя у середовищі відходів та під час проходження ними місцевих опорів – вхідного та вихідного перерізів пуансона, а також виступів 5 [5]. Для визначення даних опорів потрібно прийняти ще одне припущення. У роботі [6] обґрунтовано, що під час вібраційного навантаження вологих дисперсних матеріалів, до яких відносяться й розглядувані відходи харчових виробництв, у випадку переміщення їх частинок з прискореннями, що перевищують g, матеріали переходять у стан віброкипіння. В даному стані матеріал поводить себе, як Ньютонівська рідина, що дозволяє суттєво спростити аналіз процесів його зневоднення.

Як вказувалось вище, під час роботи вібропресової установки її виконавчі елементи і разом з ними частинки відходів у прес-формі переміщуються з прискореннями (8 ÷ 10)g, таким чином вони також будуть знаходитись у стані віброкипіння, отже для опису процесів віброударного зневоднення можуть застосовуватись рівняння гідравліки.

Зокрема, рівняння Бернуллі [5] для вхідного I – I та вихідного II – II перерізів матиме вигляд

$$Z_{II-II}+\frac{p_{вI-I}(t)}{\rho_в(t)\cdot g}+\frac{v_{вI-I}^{\ 2}}{2\cdot g}=\frac{p_{вII-II}}{\rho_в(t)\cdot g}+\frac{v_{вII-II}(t)^2}{2\cdot g}+h_\Sigma(t);\ \ 0\le t\le t_{III}, \quad (17)$$

де Z_{II-II} – вертикальна координата центру ваги перерізу I – I відносно центру ваги перерізу II – II у продовж циклу віброударного навантаження; $p_{вI-I}(t)$, $p_{вII-II}$, $v_{вI-I}$, $v_{вII-II}(t)$ – поточні тиски та середні швидкості частинок потоку відходів у перерізах I – I та II – II; $\rho_в(t)$ – поточна середня густина відходів; $h_\Sigma(t)$ – сумарні втрати напору потоку відходів між перерізами I – I та II – II, обумовлені внутрішнім тертям в їх середовищі та місцевими опорами [5].

Величину Z_{II-II} знаходимо за формулою

$$Z_{II-II}=H_п+\frac{H_в}{2}\cos\gamma, \quad (18)$$

де $H_п$ – висота пуансона 2.

Густину $\rho_в(t)$ визначаємо як [5]

$$\rho_в(t) = \frac{\rho_в}{1-\beta_в p_в(t)};\ 0 \le t \le t_{III}, \tag{19}$$

де $\rho_в$ – густина відходів при тій же самій температурі та при атмосферному тиску [2]; $\beta_в$ – коефіцієнт об'ємного стискання відходів [2, 5]; $p_в(t)$ – поточний середній тиск у середовищі відходів, що для I-го етапу ($0 \le t \le t_I$) визначається за рівнянням (11), для II-го етапу ($t_I < t \le t_{II}$) – за рівнянням (13), а для III-го етапу ($t_{II} < t \le t_{III}$) – за рівнянням (15).

Тиск $p_{II\text{-}II}$ на виході з прес-форми можна вважати постійним і рівним атмосферному тиску: $p_{II\text{-}II} = p_a$.

Швидкості $v_{I\text{-}I}$, $v_{II\text{-}II}(t)$ знаходимо, виходячи із заданої продуктивності Q зневоднення, що в свою чергу, залежіть від добової маси $m_{в.д}$ відходів на підприємстві та від тривалості $t_р$ роботи установки для зневоднення у продовж доби

$$v_{вI-I} = \frac{Q}{A_{о.п}B_п} = \frac{m_{в.д}}{\rho_в t_р A_{о.п} B_п};\ v_{вII-II}(t) = \frac{m_{в.д}}{2\cdot\rho_в t_р B_п\left[H_в - (z_I + z_{II})\cos\gamma\right]};\ 0 \le t \le t_{III}, \tag{20}$$

де $A_{о.п}$ – ширина отвору у пуансоні.

Втрати $h_\Sigma(t)$ знаходимо з використанням формул Дарсі та Вейсбаха [5]

$$h_\Sigma(t) = \frac{v_{вI-I}^2}{2\cdot g}\lambda_{в1}\frac{L_{п1}}{D_{в.г1}} + \frac{v_{вII-II}(t)^2}{2\cdot g}\left[\lambda_{в2}(t)\frac{L_{п2} - 4\cdot L_в}{D_{в.г2}(t)} + \left(\zeta_{вх} + \zeta_р + \zeta_п + 4\cdot\zeta_{зв} + 4\cdot\zeta_{роз} + \zeta_в\right)\right];$$

$$0 \le t \le t_{III}, \tag{21}$$

де $L_{п1}$, $L_{п2}$ – довжини ділянок робочої поверхні пуансона, уздовж яких переміщуються відходи; $L_в$ – довжина виступу пуансона; $D_{в.г1}$, $D_{в.г2}(t)$ – гідравлічні діаметри потоку відходів у прес-формі на ділянках довжинами $L_{п1}$, $L_{п2}$ [5]; $\lambda_{в1}$, $\lambda_{в2}(t)$ – коефіцієнти гідравлічного тертя у середовищі відходів на ділянках довжинами $L_{п1}$, $L_{п2}$ [5]; $\zeta_{вх}$, $\zeta_р$, $\zeta_п$, $\zeta_{зв}$, $\zeta_{роз}$, $\zeta_в$ – коефіцієнти місцевих опорів [5, 7] на вході у прес-форму у перерізі I – I, на розгалуженні 6, на повороті 7, на поступовому звуженні 8 виступів 5 (з кожної сторони робочої поверхні пуансона виконані по чотири такі виступи, див. також рис. 1), на раптовому розширенні 9 за виступом 5 (по чотири раптові розширення з кожної сторони), на виході з прес-форми. Нижче наведені формули для визначення складових у рівнянні (21) [2, 5]

$$\lambda_{в1} = 0{,}11\left(\frac{68}{Re_{в1}} + \frac{\Delta_п}{D_{в.г1}}\right);\ \lambda_{в2}(t) = 0{,}11\left(\frac{68}{Re_{в2}(t)} + \frac{\Delta_п}{D_{в.г2}(t)}\right);$$

$$D_{в.г1} = \frac{4\cdot A_{о.п}B_в}{2\cdot A_{о.п} + 2\cdot B_в};\ D_{в.г2}(t) = \frac{4\cdot B_в\left[H_в - (z_I + z_{II})\cos\gamma\right]}{2B_в + 2\cdot\left[H_в - (z_I + z_{II})\cos\gamma\right]}; \tag{22}$$

$$Re_{в1} = \frac{v_{вI-I}\cdot D_{в.г1}}{\nu_в};\ Re_{в2}(t) = \frac{v_{вII-II}(t)\cdot D_{в.г2}(t)}{\nu_в};\ 0 \le t \le t_{III},$$

де $Re_{в1}$, $Re_{в2}(t)$ – числа Рейнольдса відходів на ділянках довжинами $L_{п1}$, $L_{п2}$; $\nu_в$ – кінематична в'язкість відходів [2, 5]; $\Delta_п$ – середня висота мікронерівностей на внутрішніх поверхнях прес-форми та пуансона.

З використанням рівняння (17) після підстановки до нього рівнянь (18 – 22) можна знайти тиск $p_{вI\text{-}I}(t)$ у будь-який момент часу циклу вібронавантаження. Знаючи $p_{вI\text{-}I}(t)$, за аналогом з рівнянням (17), можна скласти рівняння для визначення тиску й у проміжних перерізах прес-форми, після кожного місцевого опору. Дані тиски додаються до тисків, розрахованих за формулами (9 – 11), (13 – 16), таким чином розраховується сумарний тиск у середовищі відходів

на кожній характерній ділянці прес форми, від якого залежіть продуктивність віброударного зневоднення.

Висновки

1. Спосіб віброударного зневоднення є одним з найбільш ефективних способів утилізації відходів харчових виробництв, який забезпечує високу продуктивність робочого процесу (30 – 60 т зневоднених відходів за добу), порівняно низьку енергоємність (90 кВт·год/т), необхідну для утилізації кінцеву вологість відходів (20 – 25%) та реалізується на компактному й надійному гідроімпульсному обладнанні.

2. Для впровадження способу віброударного зневоднення на виробництві у статті запропонована схема промислової гідроімпульсної установки для його здійснення, крім цього, розглянуто механізм робочого процесу та запропоновані рівняння, що зв'язують його основні параметри й дозволяють розраховувати найбільш оптимальний режим віброударного зневоднення.

1. Іскович-Лотоцький Р. Д. Аналіз способів сепарування вологих дисперсних матеріалів та обладнання для їх реалізації/ Р. Д. Іскович-Лотоцький, І. В. Севостьянов // Вісник національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Машинобудування, 2009 – Випуск №57. – С. 50–55.
2. Севостьянов И. В. Процессы и оборудование для виброударного разделения пищевых отходов. Монография/ И. В. Севостьянов. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 417 с.
3. Іскович-Лотоцький Р. Д. Основи теорії розрахунку та розробка процесів і обладнання для віброударного пресування / Іскович-Лотоцький Р. Д. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2006. – 338 с.
4. Планирование закона торможения поршня гидроцилиндра [Електронний ресурс] Режим доступу: http://www.simumath.net/library/book.html?code=Dyn_synthesis_planning_braking_law.
5. Башта Т. М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы/ Т. М. Башта, Б. Б. Некрасов. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.
6. Гончаревич И. Ф. Вибрационная техника в пищевой промышленности/ Гончаревич И. Ф., Урьев И. Б., Талейсник М. А. – М.: Пищевая промышленность, 1977. – 279 с.
7. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Идельчик И. Е. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.

Стаття надійшла до редакції 10.03.2015.

© І. В. Севостьянов