

**Міністерство освіти і науки України**  
**Національний університет харчових технологій**

**СЕВОСТЬЯНОВ ІВАН ВЯЧЕСЛАВОВИЧ**



**УДК 66.066; 66.068**

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ  
ДЛЯ ВІБРОУДАРНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ  
ВІДХОДІВ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ**

**Спеціальність 05.18.12 – процеси та обладнання харчових,  
мікробіологічних та фармацевтичних виробництв**

**Автореферат**  
**дисертації на здобуття наукового ступеня**  
**доктора технічних наук**

**Київ – 2013**

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті на кафедрі металорізальних верстатів та обладнання автоматизованого виробництва Міністерства освіти і науки України

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Іскович-Лотоцький Ростислав Дмитрович,**  
Вінницький національний технічний  
університет, завідувач кафедри  
металорізальних верстатів та обладнання  
автоматизованого виробництва

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Заплетніков Ігор Миколайович,**  
Донецький національний університет  
економіки і торгівлі імені Михайла  
Туган-Барановського, завідувач кафедри  
обладнання харчових виробництв

доктор технічних наук, професор  
**Некоз Олександр Іванович**  
Національний університет харчових  
технологій, професор кафедри  
машинобудування, стандартизації та  
сертифікації обладнання

доктор технічних наук, професор  
**Луговський Олександр Федорович,**  
Національний технічний університет  
України «Київський політехнічний  
інститут», завідувач кафедри прикладної  
гідроаеромеханіки і механотроніки

Захист відбудеться 20 лютого 2014 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.058.02 у Національному університеті харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ-33, вул. Володимирська, 68, о 14<sup>00</sup>, А311.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ-33, вул. Володимирська, 68

Автореферат розісланий 24 грудня 2013 р.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 26.058.02



к.т.н., доц. Л. О. Кривопляс-Володіна

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Останнім часом однією з основних проблем вітчизняних підприємств харчової промисловості є утилізація відходів – спиртової барди, бурякового жому, пивної дробини, кавового шламу, що відносяться до вологих дисперсних матеріалів. У більшості випадків вказані відходи виливаються на ґрунт або у водоймища, що призводить до забруднення навколишнього середовища, крім цього це вимагає додаткових витрат на їх транспортування. Більш доцільно здійснювати розділення цих відходів на тверду фазу (концентрат) і рідинну фазу з дрібнодисперсними твердими частинками. Після достатньо якісного очищення останньої отримують фільтрат, що являє собою звичайну воду і вже може бути повернутим у природу без негативних наслідків для неї або повторно використовуватись на виробництві. Концентрат після зневоднення до вологості 20 – 25%, можна застосовувати як високопоживну добавку до сільськогосподарських кормів або в якості палива. Таким чином, при реалізації описаних процесів фазового розділення комплексно розв'язуються проблеми утилізації відходів, захисту довкілля та одержання висококалорійного корму або палива.

Для розв'язання вказаних проблем нами пропонуються способи віброударного зневоднення і фільтрування на гідроімпульсному обладнанні. За результатами проведених нами досліджень, у порівнянні із відомими механічними, термічними, електролітичними, хімічними та біологічними способами, а також обладнанням різних типів для їх реалізації, пропонувані способи і обладнання забезпечують високу продуктивність процесів, при нижчих енергоємності, складності, вартості та матеріалоемності обладнання, за умови дотримання заданих кінцевої вологості концентрату відходів та якості очищення їх рідинної фази. Але для одержання високих показників ефективності віброударного зневоднення та фільтрування необхідно вибрати і забезпечити оптимальні конструктивні параметри гідроімпульсного обладнання для їх реалізації та відповідні параметри навантаження відходів, з врахуванням фізико-механічних характеристик останніх.

Значний внесок у розробку реології вологих дисперсних матеріалів зроблений у роботах П.А. Ребіндера, М.Ф. Казанського, Є.Є. Бібіка, К.П. Гучкова, В.Н. Покровського. Дослідження процесів їх статичного пресування виконані А.Я. Соколовим, М.Я. Дікісом, Н.Є. Карауловим, процесів вібраційного навантаження – І.Ф. Гончаревичем, І.Б. Урьєвим, І.М. Заплетніковим, І.П. Паламарчуком, процесів фільтрування – В.А. Жужиковим, Т.А. Малиновською, І.С. Туровським. У роботах Р.Д. Ісковича-Лотоцького розроблена резонансно-структурна теорія віброударного інерційного пресування сухих непластичних порошків. Однак визначені вищеназваними авторами закономірності протікання процесів та розроблені ними моделі є непридатними для аналізу процесів віброударного фазового розділення вологих дисперсних відходів, оскільки не враховують деякі їх важливі властивості: різницю у фізико-механічних характеристиках фаз, взаємодію між ними, наявність у відходах вільної рідини. Створене раніше гідроімпульсне

обладнання, призначалось в основному для пресування сухих порошкових заготовок, з врахуванням чого розроблялись його схеми і визначались підходи до дослідження. А оскільки характеристики сухих і вологих дисперсних матеріалів суттєво відрізняються, крім цього, ставиться за необхідність забезпечення безперервності процесів, в умовах потокового виробництва, відомі схеми і моделі гідроімпульсного обладнання не цілком придатні для розв'язання описаних вище проблем. Отже задачі досліджень закономірностей протікання та ефективності процесів віброударного зневоднення і фільтрування вологих дисперсних відходів харчових виробництв, а також розробки гідроімпульсного обладнання для їх реалізації є достатньо актуальними.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Проблеми, розв'язанню яких присвячена дисертація впливають із задач у сфері науки і техніки, сформульованих у законі України №2519-VI від 09.09.2010 р. «Про внесення змін до закону України «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки»». Дослідження і розробки, наведені у дисертаційній роботі безпосередньо пов'язані з виконанням держбюджетних тем 19-Д-287 «Розробка теорії процесів та обладнання вібраційних методів зневоднення продуктів переробки харчової промисловості» (№ держ. реєстрації 0105U002416), 19-Д-304 «Теорія процесів і обладнання для потокового віброударного сепарування та фільтрування вологих дисперсних матеріалів» (№ держ. реєстрації 0108U000653), 19-Д-331 «Теоретичні основи процесів фазового розділення вологих дисперсних матеріалів в полі віброударних інерційних навантажень» (№ держ. реєстрації 0111U901108) та госпдоговірної теми 1926 «Дослідження процесів зневоднення та розробка конструкторської документації установки для зневоднення кавового та ячмінного шламу» (№ держ. реєстрації 0110U004207). При виконанні першої із вказаних вище тем автор обіймав посаду наукового співробітника; при виконанні трьох останніх – відповідального виконавця, старшого наукового співробітника.

**Мета і завдання дослідження.** Метою даної дисертаційної роботи є розв'язання актуальних проблем утилізації вологих дисперсних відходів харчових виробництв, зменшення їх негативного впливу на довкілля та одержання сільськогосподарського корму або палива, шляхом розробки теоретичних основ процесів та гідроімпульсного обладнання для віброударного фазового розділення, що забезпечує їх найбільш ефективне використання.

Для досягнення вказаної мети необхідно виконати такі основні завдання:

- виконати аналіз способів та обладнання для фазового розділення вологих дисперсних матеріалів; теоретично та експериментально обґрунтувати високу ефективність пропонованих способів віброударного зневоднення і фільтрування відходів харчових виробництв на гідроімпульсному обладнанні, яке переважає інші види обладнання за продуктивністю, енергоємністю та кінцевою вологістю концентрату відходів, що забезпечується;

- розробити схеми високоефективних технологічних процесів та гідроімпульсного обладнання для віброударного фазового розділення відходів харчових виробництв;

- розробити схеми навантаження відходів під час їх віброударного фазового розділення, а також динамічні моделі відходів, які враховують їх основні фізико-механічні характеристики (масу частинок, пружність, в'язкість, пластичність); розкрити за допомогою запропонованих схем та моделей закономірності протікання та ефективності досліджуваних процесів зневоднення та фільтрування;

- розробити математичні моделі досліджуваних процесів, рівняння яких зв'язують параметри ефективності процесів, конструктивні параметри гідроімпульсного обладнання (маси виконавчих елементів, розміри гідроліній, подачі насосів, потужності електродвигунів) та фізико-механічні характеристики відходів;

- розробити математичні моделі досліджуваного гідроімпульсного обладнання для віброударного фазового розділення, рівняння яких зв'язують параметри навантаження вологих дисперсних відходів, їх фізико-механічні характеристики та конструктивні параметри обладнання;

- створити експериментальні гідроімпульсні стенди – прототипи досліджуваного обладнання та перевірити з їх допомогою коректність розроблених математичних моделей;

- розробити методики проектного розрахунку гідроімпульсного обладнання для віброударного фазового розділення відходів, що дозволяють, виходячи з їх фізико-механічних характеристик та параметрів навантаження, визначати оптимальні конструктивні параметри обладнання, за умови забезпечення максимальної продуктивності і мінімальної енергоємності робочих процесів.

**Об'єкт дослідження** – процеси віброударного зневоднення та фільтрування вологих дисперсних відходів харчових виробництв.

**Предмет дослідження** – гідроімпульсне обладнання для реалізації процесів віброударного фазового розділення вологих дисперсних відходів харчових виробництв, закономірності протікання та ефективності даних процесів.

**Методи дослідження.** Під час теоретичних досліджень процесів віброударного зневоднення та фільтрування харчових відходів, зокрема для визначення закономірностей їх протікання та ефективності, застосовувались пружно-в'язко-пластично-інерційні реологічні моделі, диференціальні рівняння руху частинок відходів та виконавчих елементів гідроімпульсного обладнання, рівняння втрат тиску та витрат рідинної фази відходів, положення та залежності теорії гідравлічного і механічного удару, елементи резонансно-структурної теорії віброударного пресування сухих порошків. В процесі теоретичних досліджень гідроімпульсного обладнання для віброударного розділення використовувалась методика загальної теорії гідравлічних ковальсько-штампувальних машин. Крім цього, під час моделювання досліджуваних процесів та обладнання застосовувався прикладний пакет програмування Matlab R2007a Simulink. Експериментальні дослідження проводились за допомогою тензометричних датчиків тиску, зусилля та переміщень, аналогово-цифрового перетворювача, комп'ютера та програмного пакету LGraph2; для

обробки одержаних експериментальних даних застосовувались методи теорії ймовірностей.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

1. Вперше проведений аналіз закономірностей протікання процесів віброударного фазового розділення харчових відходів окремо для кожної їх фази, кожної ділянки порції відходів та кожного етапу циклу спрацьовування привода гідроімпульсного обладнання, на якому здійснюється розділення. Це дозволило спростити аналіз та підвищити точність визначення робочих параметрів процесів.

2. Розвинена реологія вологих дисперсних матеріалів, що була доповнена їх безінерційними реологічними моделями в процесі віброударного інерційного навантаження та системами реологічних рівнянь, за допомогою яких можуть визначатись зміни дотичних і стискаючих напружень, а також деформацій матеріалу.

3. Вперше розрахунковим шляхом встановлено, що висока ефективність віброударного зневоднення харчових відходів у порівнянні з їх статичним пресуванням, обумовлена істотно вищою (у 3 і більше разів) швидкістю передачі енергії від виконавчих елементів вібропреса частинкам відходів, при менших у 40 - 50 разів загальних енерговитратах. Крім цього, забезпечується збільшення у 10 – 20 разів прискорень частинок відходів, що призводить до відповідного зростання сил їх інерції, ймовірності руйнування зв'язків між частинками, а отже й ступеню зневоднення концентрату відходів.

4. Вперше на підставі результатів розрахунків та експериментів обґрунтована висока ефективність потокового віброударного фільтрування рідинної фази харчових відходів, яка обумовлена створенням в їх середовищі ударних хвиль напружень та деформацій. Це призводить до періодичної зміни у 3 – 4 рази тиску у середовищі відходів та швидкості їх руху (на 10 – 12%), зменшення сили тертя між твердими частинками, товщини шару осаду на внутрішніх поверхнях фільтрувальної мембрани та забивання її пор, підвищення (на 20 – 30%) і стабілізації в часі продуктивності процесу фільтрування.

5. Розроблені динамічні інерційно-пружно-в'язко-пластичні моделі руху твердих та рідинних частинок харчових відходів під час їх віброударного розділення, а також математичні моделі досліджуваних процесів, за допомогою яких можуть розраховуватись робочі параметри процесів, а також параметри їх ефективності: продуктивність, енергоємність та кінцева вологість відходів.

6. Запропоновані динамічні та математичні моделі гідроімпульсного обладнання для віброударного фазового розділення харчових відходів, що зв'язують параметри навантаження останніх, їх фізико-механічні характеристики та конструктивні параметри обладнання.

### **Практичне значення одержаних результатів**

1. На базі інерційних вібропрес-молотів створені гідроімпульсні стенди для віброударного фазового розділення вологих дисперсних відходів харчових виробництв, за допомогою яких експериментально доведена коректність розроблених моделей досліджуваних процесів та обладнання.

2. Вперше запропонована раціональна послідовність реалізації досліджуваних процесів, згідно із якою вони розділюються на ряд послідовних стадій, на кожній з яких використовується окрема одиниця обладнання, з підвищенням від стадії до стадії питомих зусиль навантаження відходів та забезпеченням найкращих параметрів ефективності. Розроблені перспективні схеми гідроімпульсного обладнання для реалізації запропонованої послідовності, а також рекомендації з їх впровадження на виробництві.

3. Розроблені методики розрахунку обладнання для віброударного фазового розділення вологих дисперсних відходів, що дозволяють, виходячи з їх фізико-механічних характеристик та параметрів навантаження, визначати оптимальні конструктивні параметри обладнання, за умови забезпечення максимальної продуктивності та мінімальної енергоємності процесів.

4. Розрахований економічний ефект від впровадження пропонованих процесів та гідроімпульсного обладнання для віброударного фазового розділення вологих дисперсних відходів на підприємствах харчової промисловості: Львівському СП «Галка Лтд», Львівському науково-виробничому підприємстві «Термінал», Обухівському ТОВ «ЮГОВ», визначений термін окупності обладнання.

5. Розроблена конструкторська документація вискоефективної гідроімпульсної установки для потокового віброударного зневоднення харчових відходів, прийнята до впровадження на вказаних вище підприємствах.

#### **Особистий внесок здобувача**

Основні результати дисертаційної роботи: динамічні та математичні моделі, структурні, принципів та конструктивні схеми, методики проектного розрахунку досліджуваних процесів та обладнання, розрахункові та експериментальні залежності, одержані автором самостійно.

#### **Впровадження результатів роботи**

Розроблені у роботі схеми та методики розрахунку впроваджені на спільному підприємстві «Галка Лтд», Львівському науково-виробничому підприємстві «Термінал», Обухівському ТОВ «ЮГОВ» та у Вінницькому національному технічному університеті.

#### **Апробація результатів дисертації**

Матеріали дисертації доповідались та обговорювались у 1999 - 2013 рр. на науково-технічних конференціях Вінницького національного технічного університету, на міжнародних науково-практичних та науково-технічних конференціях «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці», у 2002, 2010 рр. у м. Київ, у 2007 р. у м. Луганськ, у 2011 р. у м. Вінниця, у 2012 р. у м. Черкаси, міжнародній науково-практичній конференції «Теоретичні і експериментальні дослідження в технологіях сучасного матеріалознавства та машинобудування» у 2007 р. у м. Луцьк, міжнародних науково-технічних конференціях «Прогресивні техніка і технологія – 2009, 2012» у 2009, 2012 рр. у м. Севастополь, міжнародній науково-технічній конференції «Вібрації в техніці та технологіях» у 2009 р. у м. Вінниця, II-й Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві» у

2012 р. у м. Суми, XIII міжнародній науково-технічній конференції «Промислова гідравліка і пневматика» у 2012 р. у м. Чернігів.

Зроблені доповіді по завершеній дисертаційній роботі на науковому семінарі кафедри процесів і апаратів харчових виробництв Національного університету харчових технологій (завідувач кафедри, д. т. н., проф. Шевченко О. Ю.), на засіданні кафедри прикладної гідроаеромеханіки та мехатроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» (завідувач кафедри – д.т.н., проф. О.М.Яхно), на міжкафедральних наукових семінарах у Сумському державному університеті (керівник семінару – д.т.н., проф. В.І.Склабінський) та Національному університеті «Львівська політехніка» (керівник семінару – д.т.н., проф. В.В.Чернюк).

### **Публікації**

Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 43 друкованих працях, з них: 2 монографії; 31 стаття, в тому числі 26 статей у фахових виданнях та 8 статей у наукових виданнях інших держав та у виданнях України, що включені до міжнародних наукометричних баз; 4 патенти; 6 тез доповідей.

### **Структура та обсяг дисертації**

Дисертаційна робота складається зі вступу, 7 розділів основної частини, загальних висновків та списку використаних джерел. Повний обсяг роботи становить 450 сторінок. Основний зміст викладено на 334 сторінках, з них 92 рисунки, 4 таблиці по тексту, список використаних інформаційних джерел складає 323 найменування на 30 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** описані науково-технічні проблеми, розв'язанню яких присвячена дисертація, обґрунтована актуальність теми, відображено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, визначені мета і завдання досліджень, показано наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, представлені особистий внесок здобувача, відомості про структуру дисертаційної роботи, апробацію її результатів та публікації.

У **першому розділі** наведено аналіз способів та обладнання для зневоднення і очищення вологих дисперсних матеріалів, а також відомих положень і залежностей, одержаних під час досліджень процесів їх механічної обробки. Представлені елементи резонансно-структурної теорії віброударного пресування сухих непластичних порошків Р. Д. Ісковича-Лотоцького.

Згідно із запропонованими у розділі класифікаціями способів зневоднення і очищення вологих дисперсних матеріалів, всі вони можуть бути умовно поділені на механічні, електролітичні, термічні, хімічні та біологічні, при цьому велика їх частина є фактично комбінованими способами.

Найбільш відоме обладнання для механічного зневоднення – шнекові преси та декантерні центрифуги – не забезпечують заданої вологості концентрату оброблюваного матеріалу (20 – 25%). Електролітичне зневоднення є енергоємним і малопродуктивним. Термічні способи, що реалізуються на вакуумних, розпилювальних, барабаних сушарках, потребують найбільших

витрат енергії і можуть використовуватись лише для остаточного зневоднення. Хімічні та біологічні способи часто мають низьку продуктивність і здійснюються на громіздкому, матеріалоемному та дорогому обладнанні, зі значними витратами електроенергії, води, стисненого повітря та хімікатів.

Одним з найефективніших способів очищення вологих дисперсних матеріалів є їх тангенціальне потокове фільтрування через трубчасті керамічні мембрани. При циркуляції оброблюваного матеріалу по каналах мембрани, рідинна фаза проходить у порах в її стінках та фільтрується. Тверді частинки затримуються мембраною. При цьому товщина  $s_0$  осаду на поверхнях мембрани залишається постійною, оскільки більша його частина змивається основним потоком. Тому, витрати  $Q_\phi$  фільтрату зменшуються не так інтенсивно. Але і в даному випадку пори мембрани з часом забиваються. Крім цього, для забезпечення заданої  $Q_\phi$  необхідно підтримувати одночасно значну швидкість матеріалу (до  $Re = 2400$ ) та високий тиск в його середовищі (до 10,5 МПа), що в умовах потокового виробництва, призводить до великих енерговитрат.

Згідно із класифікацією П. А. Ребіндера, тверді частинки харчових відходів, що розглядаються у роботі, являють собою колоїдні капілярно-пористі тіла, оскільки після видалення з них рідини та стискання вони проявляють еластичність і частково руйнуються. Рідину, що міститься у вологих дисперсних матеріалах, за енергією зв'язку  $E$  можна поділити на вільну, капілярно-зв'язану, адсорбційно-зв'язану та хімічно-зв'язану. При цьому за допомогою механічних способів зневоднення можна видалити рідину, що має зв'язки перших трьох видів.

До основних фізико-механічних характеристик вологих дисперсних матеріалів при реалізації процесів їх віброударного фазового розділення слід віднести пружність, пластичність, в'язкість та інерційні властивості матеріалу.

У реальних вологих дисперсних матеріалах в процесі їх навантаження основні фізико-механічні характеристики моделюються за допомогою тіл Гука, Ньютона та Сен-Венана, що відображують відповідно пружність, в'язкість та пластичність матеріалу (рис. 1). Відомими моделями складних структур є: в'язко-пластична модель Шведова-Бінгама, пружно-в'язкі моделі Кельвіна та Максвела, пружно-в'язко-пластична модель Бінгама, пружно-в'язко-пластично-інерційна модель Гончаревича – Урьєва. Але жодна з вказаних моделей не є цілком придатною для аналізу процесів віброударного фазового розділення вологих дисперсних відходів, оскільки не враховує ту чи іншу їх властивість (наприклад, різницю у фізико-механічних характеристиках фаз, взаємодію між ними, наявність у відходах вільної рідини), а також умови навантаження.

Як відомо, у складних моделях прості реологічні тіла можуть бути сполучені послідовно або паралельно (рис. 2). При послідовному сполученні тіла сприймають однакове напруження, а їх загальна деформація буде дорівнювати сумі деформацій кожного тіла. При паралельному сполученні тіла сприймають однакові деформації, а загальне напруження, яку сприймає їх сукупність, є сумою напружень, що сприймаються кожним окремим тілом. Таким чином, результуюча жорсткість при послідовному та паралельному сполученні пружних елементів визначається за такими формулами

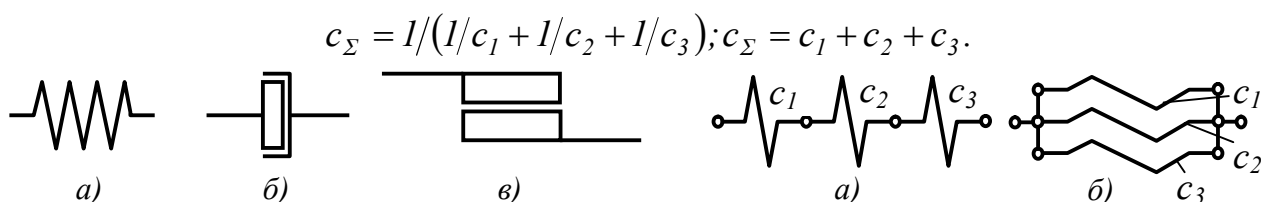


Рис. 1. Механічні моделі тіл:

- a* – Гука;
- б* – Ньютона;
- в* – Сен-Венана.

Рис. 2. З'єднання пружних елементів:

- a* – послідовне;
- б* – паралельне.

Згідно із резонансно-структурною теорією Р. Д. Ісковича-Лотоцького, висока ефективність віброударного пресування заготовок з непластичних порошків на інерційних вібропрес-молотах з гідроімпульсним приводом (ІВПМ з ГП), обумовлена наявністю в кожному імпульсі зовнішніх сил, що передаються від нижнього виконавчого елемента ІВПМ, складових у вигляді пакету синусоїдальних хвиль. При цьому діапазон кутових частот пакету є настільки широким, що до нього гарантовано потрапляють власні кутові частоти частинок матеріалу заготовки. Останнє обумовлює їх інтенсивні коливання в області резонансу, взаємне прослизання, повертання та більш щільне укладання частинок, а також руйнування їх структурних утворень. Дані коливання передаються частинкам верхніх шарів заготовки, таким чином, у її середовищі виникають дотичні та стискаючі напруження, що поширюються хвилями в напрямку від днища прес-форми до пуансона й у зворотному напрямку. В результаті при мінімальних витратах енергії і часу забезпечується рівномірне ущільнення матеріалу по всьому об'єму прес-форми.

При цьому ГП є одним з найбільш придатних типів привода для вібропресового обладнання, оскільки дебалансні приводи не забезпечують незалежного регулювання в широких межах частоти і амплітуди коливань виконавчого елемента, крім цього, мають порівняно низьку надійність. Гідравлічні приводи також не досить надійні та універсальні. Електромагнітні та електродинамічні приводи є дорогими, чутливими до засмічення, крім цього, створюють при роботі навколо себе потужні електромагнітні поля.

Результати наведеного у першому розділі дисертації аналізу дозволили сформулювати основні завдання роботи: дослідити процеси віброударного зневоднення і фільтрування вологих дисперсних відходів харчових виробництв та розробити високоефективне гідроімпульсне обладнання для їх реалізації.

У **другому розділі** експериментально за допомогою гідроімпульсних стендів, створених на базі вібропресів ІВПМ, обґрунтована висока ефективність пропонувананих способів віброударного зневоднення та фільтрування.

Під час експериментів зі стендом для віброударного зневоднення, піддон з відходами (концентратом кавового шламу, бурякового жому та спиртової барди з початковою вологістю  $U_n = 75\%$ ) проходив між валками, установленими на вібростолі та рухомій траверсі ІВПМ. Валки приводились в обертання за допомогою рукояток, крім цього здійснювали вертикальні зворотно-поступальні переміщення з частотою до 40 Гц і амплітудою до 2 мм. Були отримані експериментальні залежності параметрів ефективності

досліджуваного способу зневоднення – продуктивності  $P_{з.р}$  [кг/хв] за видаленою з відходів рідиною, енергоємності  $\epsilon_3$  [кВт·год/т] та кінцевої вологості концентрату  $U_k$  [%] – від параметрів навантаження: амплітуди  $z_{1a}$  та частоти  $\nu$  коливань вібростолу, максимального тиску  $p_{z.max}$  у порожнині гідроциліндра ГПП та швидкості  $v_n$  переміщення піддону. Дані залежності дозволили визначити оптимальні режими навантаження під час віброударного зневоднення, при реалізації яких  $U_k$  складала залежно від виду відходів 20 – 24%, тоді як при зневодненні на шнекових пресах і декантерних центрифугах вона не менша 30 – 77%. Щоправда, за  $P_{з.р}$  та  $\epsilon_3$  стенд поступається вказаному відомому обладнанню, але це обумовлено тим, що він є дослідним зразком, створеним на базі машини іншого призначення. Крім цього, після зневоднення на шнекових пресах або центрифугах вологі дисперсні матеріали, для досягнення заданої  $U_k$ , обов'язково піддаються сушінню, що суттєво збільшує загальну енергоємність процесу зневоднення та знижує його продуктивність (наприклад, при зневодненні бурякового жому на найбільш економічних вакуумних сушарках  $\epsilon_3 = 740 \div 760$  кВт·год/т, тоді як при використанні пропонованих способу та обладнання середня  $\epsilon_3$  складає 90 кВт·год/т).

В процесі експериментів зі стендом для потокового віброударного фільтрування (рис. 3), рідинна фаза відходів (кавового шламу, бурякового жому та спиртової барди) з дрібнодисперсними твердими частинками подавалась насосом 1 по каналах трубчастої керамічної фільтрувальної мембрани 2. За допомогою кранів 3, 4 у середовищі відходів створювався необхідний тиск  $p_{м.н.}$ . Рідинна фаза витіснялась через стінки мембрани, фільтрувалась і стікала в резервуар 5. Поршень гідроциліндра 6, зв'язаний з вібростолом 7 стенду, здійснював вертикальні зворотно-поступальні переміщення з частотою до 150 Гц і амплітудою до 2,5 мм, створюючи у середовищі відходів ударні хвилі напружень та деформацій. Були отримані експериментальні залежності продуктивності  $Q_{\phi}$  віброударного фільтрування від параметрів навантаження: амплітуди  $z_{1a}$  і частоти  $\nu$  коливань вібростолу, а також максимального тиску  $p_{м.маx}$  у середовищі відходів, що дозволили визначити оптимальні режими реалізації пропонованого способу. При їх використанні  $Q_{\phi}$  є на 18,6 – 31,2% вищою та стабільнішою в часі, ніж продуктивність  $Q_{\phi.б}$  безударного фільтрування (рис. 4).

Але для забезпечення високих показників ефективності пропонованих способів необхідно розробити раціональну технологічну послідовність їх реалізації, схеми обладнання для здійснення цієї послідовності, установити залежності, що зв'язують параметри ефективності робочих процесів, фізико-механічні характеристики відходів та параметри обладнання. Ці завдання розв'язуються у наступних розділах дисертації.

У **третьому розділі** наведені схеми та вимоги до процесів і обладнання для віброударного фазового розділення харчових відходів, використання і врахування яких забезпечить їх найефективнішу реалізацію. Зокрема встановлено, що пропоновані способи доцільно здійснювати у декілька послідовних стадій (рис. 5), з використанням на кожній з них окремої одиниці обладнання і з підвищенням від стадії до стадії питомого зусилля навантаження

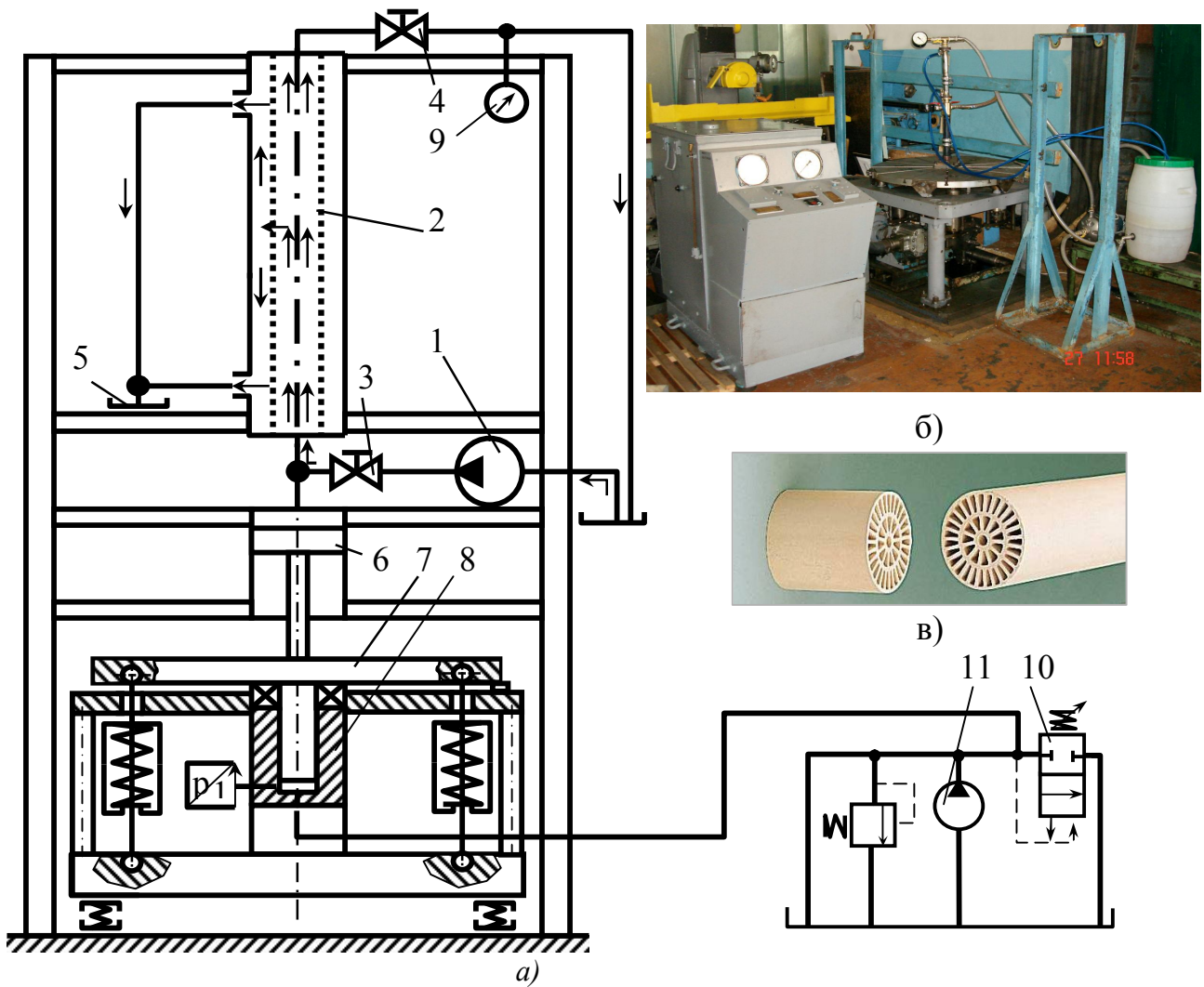


Рис. 3. Схема (а) та фотографія (б) гідроімпульсного стенду для віброударного фільтрування харчових відходів на базі вібропреса ІМЗГК-5; в – фільтрувальна мембрана, що використовувалась під час експериментів: 1 – циркуляційний насос; 2 – фільтрувальна мембрана; 3, 4 – крани; 5 – бак для фільтрату; 6 – гідроциліндр для створення у середовищі відходів ударних хвиль; 7 – вібростіл; 8 – гідроциліндр ГПП; 9 – пружинний манометр; 10 – віброзбуджувач ГПП; 11 – насос ГПП.

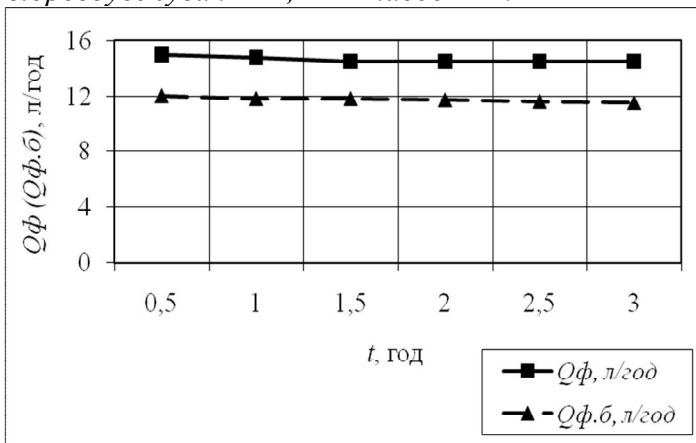


Рис. 4. Експериментальні залежності зміни в часі продуктивності віброударного фільтрування кавового шламу –  $Q_f$ , при  $z_{1a}=2,5 \cdot 10^{-3}$  м,  $\nu=30$  Гц,  $p_{m,max}=0,65$  МПа; та безударного фільтрування шламу –  $Q_{f.б}$ , при  $p_{m,n}=0,2$  МПа.

відходів. На першій стадії – попереднє зневоднення на віброударному ситі з ГПП до вологості 80 – 85%. Далі – друге і третє зневоднення на шнековому пресі та вібропресі з ГПП до вологості 50 – 55%, після чого – остаточне зневоднення на вальцьовому пресі з ГПП до вологості 20 – 25%. На кожній з вищевказаних стадій збирається рідинна фаза відходів, що проходить потім мікро-, ультра- і нанофільтрування на установках з ГПП.

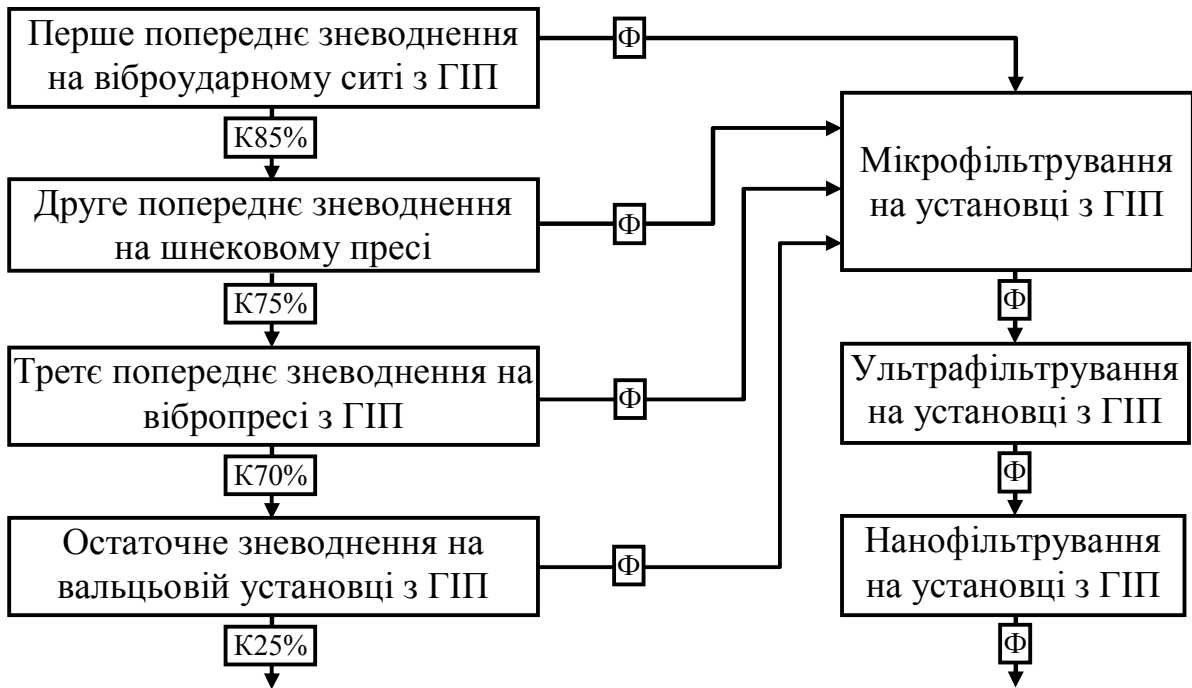


Рис. 5. Загальна послідовність реалізації технологічних процесів фазового розділення вологих дисперсних відходів харчових виробництв.

На рис. 6 представлена схема шнекового преса та вібропреса з ГП для другого і третього зневоднення. Концентрат відходів через патрубок 1 завантажується у шнековий прес, що приводиться від електродвигуна 2 через редуктор 3.

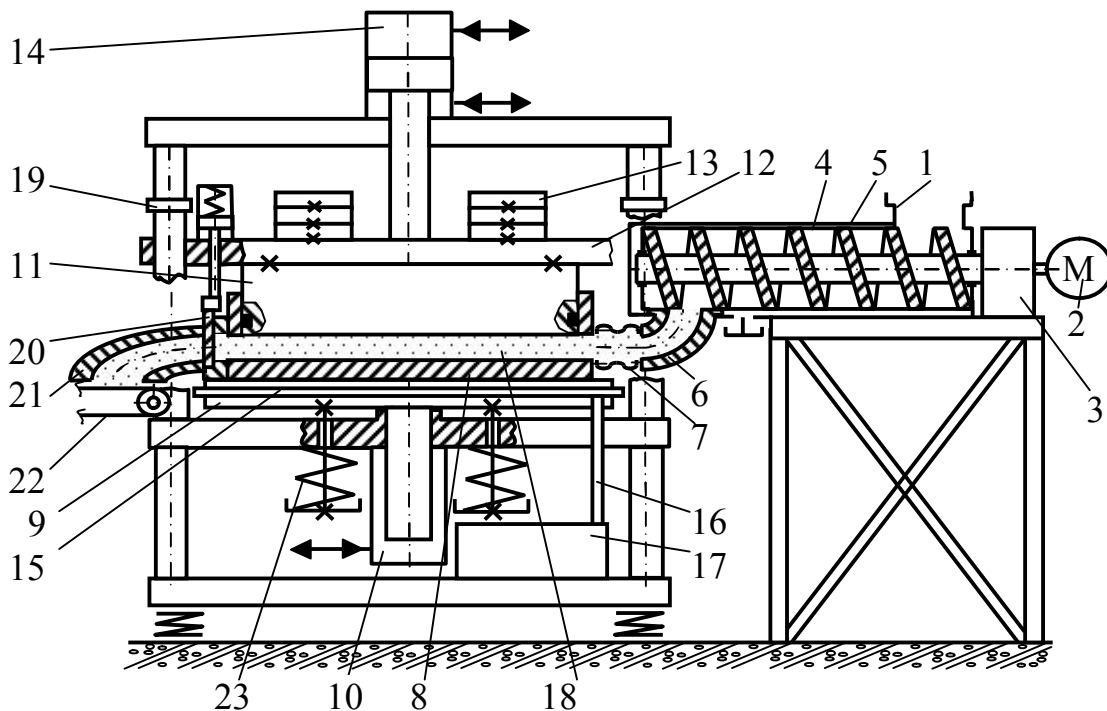


Рис. 6. Схема технологічного комплексу на базі шнекового преса та вібропреса з ГП для попереднього зневоднення вологих дисперсних харчових відходів: 1, 6, 21 – патрубки; 2 – електродвигун; 3 – редуктор; 4 – внутрішній циліндр; 5 – зовнішній циліндр; 7 – гумовотканинний рукав; 8 – прес-форма; 9 – вібростіл; 10 – гідроциліндр ГП; 11 – пуансон; 12 – рухома траверса; 13 – інерційні вантажі; 14 – допоміжний гідроциліндр; 15 – жолоб; 16 – еластична трубка; 17 – бак; 18 – порція концентрату, що зневоднюється; 19 – обмежувачі; 20 – заслінка; 22 – конвеєр; 23 – пружини повернення вібростолу.

редуктор 3. Під час переміщення і стискання у внутрішньому циліндрі 4 концентрату видалена з нього рідинна фаза з дрібнодисперсними твердими частинками, стікає через дрібні отвори у стінках, закриті з середини фільтрувальною сіткою, у зовнішній циліндр 5. Далі концентрат через патрубок 6 та гумовотканинний рукав 7 потрапляє до прес-форми 8 вібропреса, після заповнення якої шнековий прес зупиняється. Вмикаються приводи вібропреса, вібростіл 9 якого, зв'язаний з плунжером гідроциліндра 10 ГП, здійснює зворотно-поступальні вертикальні переміщення, створюючи знизу віброударне навантаження концентрату. Зверху концентрат у прес-формі 8 навантажений інерційним зусиллям, створюваним пуансоном 11, рухомою траверсою 12 і вантажами 13, а також статичним зусиллям, яке забезпечує допоміжний гідроциліндр 14. Віджата рідина виводиться через закриті фільтрувальною сіткою отвори прес-форми 8, (на схемі не показані), стікає у жолоб 15 навколо вібростолу, а далі по еластичній трубці 16 у бак 17. Після зневоднення порції концентрату 18 до заданої вологості (див. рис. 5), ГП вимикається, а траверса 12 з пуансоном 11 піднімаються вверх до упору у обмежувачі 19. При цьому заслінка 20, що під час зневоднення перекриває патрубок 21, також піднімається. Вмикається шнековий прес, що забезпечує витискання зневодненої порції через патрубок 21 на конвеєр 22 та заповнення прес-форми 8 наступною порцією. Далі шнековий прес вимикається, опускається траверса 12 та вмикається ГП; цикл зневоднення відходів повторюється.

У розділі наведені також схеми іншого обладнання для здійснення пропонованої послідовності процесів фазового розділення (див. рис. 5). Оскільки вібропрес на рис. 6 є обладнанням періодичної дії, для забезпечення ритмічної роботи всього комплексу для фазового розділення в умовах потокового виробництва між віброударним ситом та вібропресом, а також між вібропресом та вальцевою установкою (див. рис. 5) необхідно установити накопичувальні буферні бункери відповідної місткості.

**Четвертий розділ** присвячений розробці теоретичних основ процесів віброударного фазового розділення вологих дисперсних харчових відходів.

На рис. 7 представлена схема віброударного інерційного навантаження порції вологих дисперсних відходів в процесі їх попереднього зневоднення у прес-формі закритого типу на вібропресі (див. також рис. 6). На схемі позначені:  $m_I$  –

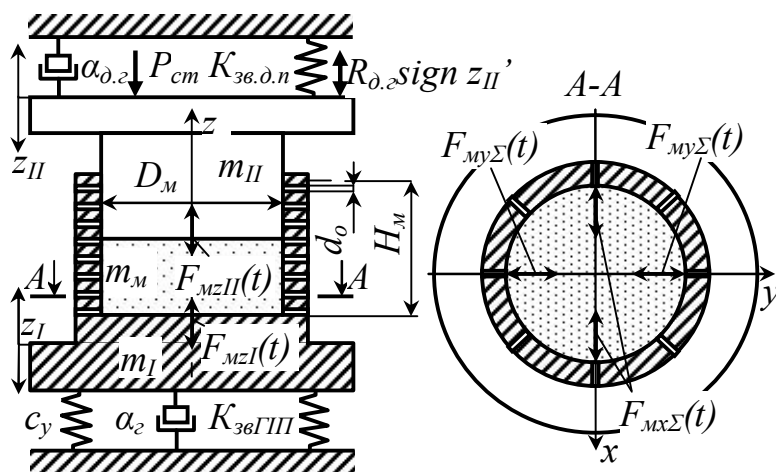


Рис. 7. Схема віброударного навантаження порції харчових відходів під час їх зневоднення у прес-формі.

масою нижнього виконавчого елемента – вібростолу 9 та жорстко зв'язаних з ним плунжера гідроциліндра 10 ГП і прес-форми 8;  $m_{II}$  – масою верхнього виконавчого елемента – пуансона 11 діаметром  $D_M$  з рухомою траверсою 12, вантажами 13, поршнем і плунжером

гідроциліндра 14;  $m_m$  – маса порції 18 відходів у прес-формі з початковою висотою  $H_m$ ;  $z_I, z_{II}, z_I', z_{II}'$  – переміщення та швидкості мас  $m_I$  і  $m_{II}$ ;  $c_y$  – жорсткість пружин 23 повернення вібростолу;  $\alpha_z, \alpha_{d.z}$  – коефіцієнти в'язкого демпфірування при переміщенні плунжера гідроциліндра 10 та поршня гідроциліндра 14;  $R_{d.z} \text{sign } z_{II}'$  – сила сухого тертя при переміщенні поршня гідроциліндра 14;  $P_{cm}$  – зусилля статичного притискання пуансона до порції 18;  $K_{зв.ГП}, K_{зв.д.п}$  – зведені модулі об'ємної пружності підсистем ГП та допоміжного привода при створенні зусилля  $P_{cm}$ ;  $F_{mzI}(t), F_{mzII}(t), F_{mx\Sigma}(t), F_{my\Sigma}(t)$  – поточні значення зусиль, що діють на частинки порції відходів відносно осей  $z, x, y$  з боку виконавчих елементів;  $d_o$  – діаметри отворів у прес-формі, закритих фільтрувальною сіткою.

За допомогою схем навантаження і руху твердих частинок порції відходів у осьовому та поперечному перерізах прес-форми, на різних етапах циклу спрацьовування ГП були визначені закономірності протікання та ефективності досліджуваних процесів віброударного зневоднення. На рис. 8 представлена

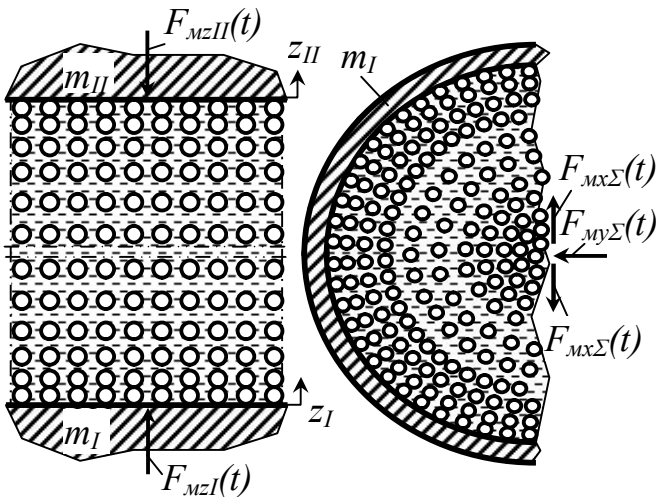


Рис. 8. Схеми навантаження та руху твердих частинок харчових відходів під час їх віброударного зневоднення на I-му етапі циклу спрацьовування ГП у осьовому та поперечному перерізах прес-форми.

одна з цих схем для I-го етапу циклу тривалістю  $t_I$ , що відповідає тривалості  $t_o$  відкриття віброзбуджувача ГП. На даному етапі тиск робочої рідини у порожнині гідроциліндра ГП збільшується від зливного  $p_3$  до максимального  $p_{z.max} = p_3 + \Delta p_{y\partial II}$ , в результаті чого маси  $m_I$  та  $m_{II}$  переміщуються вгору. Відповідно тиску  $p_z$  змінюються і зусилля  $F_{mzI}, F_{mzII}, F_{mx\Sigma}, F_{my\Sigma}$ .

Висока ефективність пропонованого способу зневоднення обумовлена проходженням під час його реалізації у середовищі порції відходів хвиль дотичних та стискаючих, прямих і зворотних деформацій та напружень, що забезпечує періодичне перерозподілення твердих частинок по об'єму прес-форми з їх поворотами, взаємними зсувами, більш щільним укладанням та видаленням з проміжків між ними рідини. За результатами, наведених у роботі розрахунків, при реалізації віброударного пресування харчових відходів у порівнянні з їх статичним пресуванням у 3 і більше разів підвищується швидкість передачі енергії від виконавчих елементів вібропреса частинкам порції відходів, при менших (у 40 – 50 разів) загальних енерговитратах. У 10 – 20 разів зростають прискорення частинок, а отже і ймовірність руйнування структурних і фізико-механічних зв'язків між ними.

Розроблені безінерційні реологічні моделі вологого дисперсного матеріалу (рис. 9), на яких позначені:  $c_{mx}, c_{my}, c_{mz}, c_{px}, c_{py}, c_{pz}$  – коефіцієнти жорсткості твердої та рідинної частинок оброблюваного матеріалу відносно

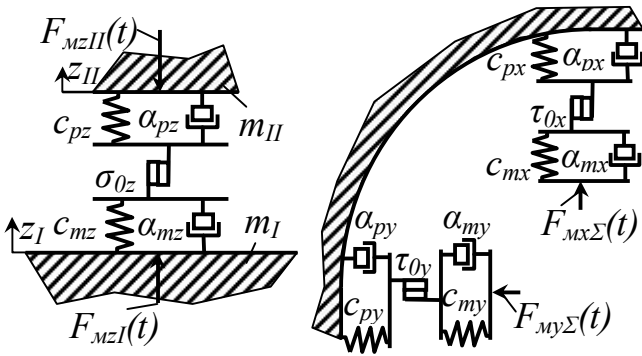


Рис. 9. Безінерційні реологічні моделі вологого дисперсного матеріалу в процесі його віброударного інерційного навантаження на I-му та II-му етапах циклу спрацьовування ГП.

деформацій матеріалу у продовж його віброударного інерційного навантаження. При цьому на II-му етапі тиск у порожнині гідроциліндра ГП зменшується від  $p_{z,max}$  до  $p_z$ , а маси  $m_I$  та  $m_{II}$  продовжують уповільнений підйом до зупинки у верхньому положенні. Реологічні рівняння оброблюваного матеріалу відносно осі  $z$  мають вигляд

$$\begin{cases} c_{pz}z_p + \alpha_{pz}\dot{z}_p - c_{mz}z_{m,np} - \alpha_{mz}\dot{z}_m - \sigma_{0z} = 0; \\ z_I - z_{II} = z_{m,nl} + z_{m,np} + z_p; \end{cases} \quad 0 \leq t \leq t_I + t_{II}, \quad (1)$$

де  $t_{II}$  – тривалість II-го етапу;  $z_m$ ,  $z_{m,np}$ ,  $z_{m,nl}$  – загальна, пружна та пластична деформація твердої фази;  $z_p$  – стискання рідинної фази матеріалу відносно осі  $z$ .

Були складені схеми навантаження твердої та рідинної частинок відходів і виконавчих елементів вібропреса, а також динамічні моделі руху частинок фаз порції відходів під час їх віброударного зневоднення (рис. 10). На моделях (див. рис. 10), окрім вищевказаних параметрів позначені:  $m_m$  – маса твердої частинки

у повітрі;  $m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)}$  – маса тої самої частинки при її переміщенні в об'ємі порції

під час віброударного зневоднення у прес-формі (є меншою  $m_m$ , оскільки тверда частинка переміщується у рідинному середовищі й на неї діє сила Архімеда);  $\rho_m(t)$ ,  $\rho_p(t)$  – поточні значення густини твердої та рідинної фаз порції відходів;

$m_m \left(1 - \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)}\right)$  – зменшення маси твердої частинки у порівнянні із масою  $m_m$ ,

обумовлене впливом сили Архімеда (на рис. 10, а показано, що при зміщенні з вихідного положення маси  $m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)}$  маса  $m_m \left(1 - \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)}\right)$  залишиться на місці);

$x_m$ ,  $y_m$ ,  $x_p$ ,  $y_p$  – переміщення мас  $m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)}$  та  $m_p(t)$  відносно осей координат  $x$ ,  $y$ .

Ущільнення твердої частинки моделюється клиновим елементом.

осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  (рідинними частинками ми будемо називати рідину, що знаходиться у каналах між двома найближчими твердими частинками порції);  $\alpha_{mx}$ ,  $\alpha_{my}$ ,  $\alpha_{mz}$ ,  $\alpha_{px}$ ,  $\alpha_{py}$ ,  $\alpha_{pz}$  – коефіцієнти в'язкості твердої та рідинної частинок при їх переміщенні відносно осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ;  $\tau_{0x}$ ,  $\tau_{0y}$ ,  $\sigma_{0z}$  – межі текучості твердої частинки відносно осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . На підставі моделей складені системи реологічних рівнянь на I-му та II-му етапах циклу ГП, що дозволяють визначати зміну дотичних і стискаючих напружень, а також

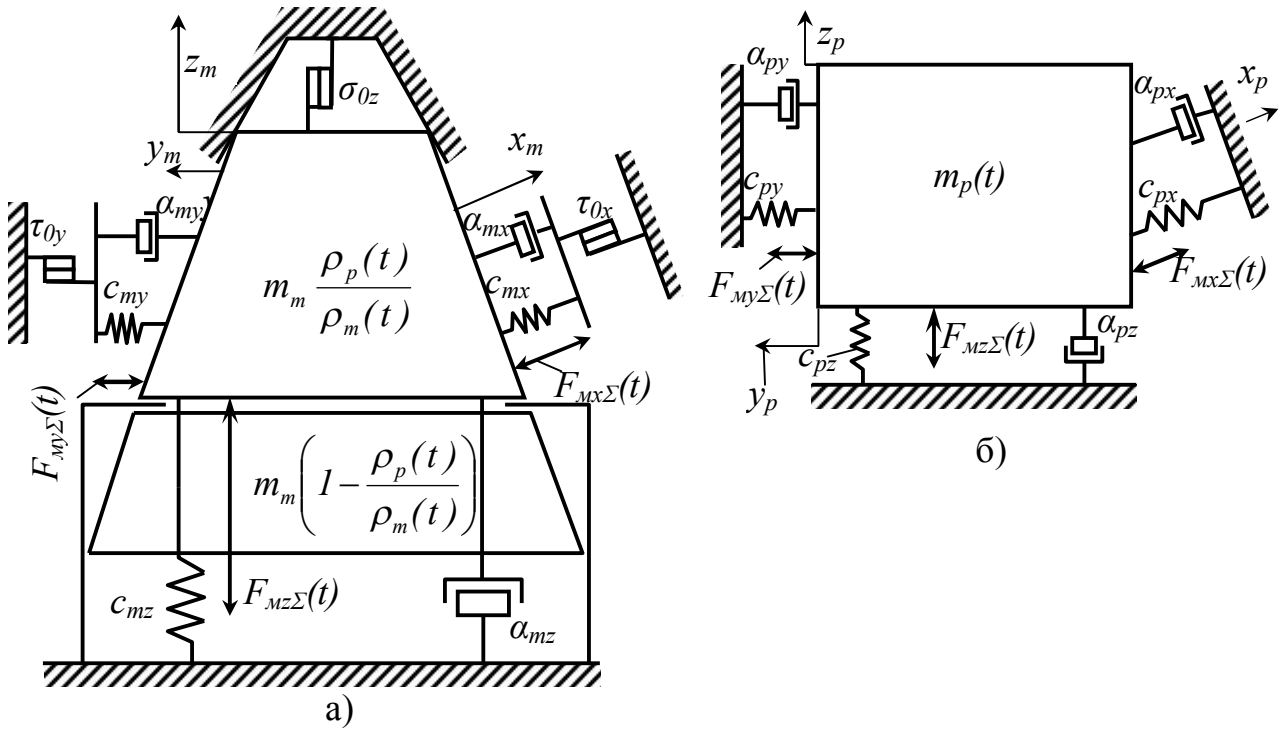


Рис. 10. Динамічні моделі руху частинок твердої (а) та рідинної (б) фаз порції вологих дисперсних відходів харчових виробництв в процесі їх попереднього віброударного зневоднення у прес-формі закритого типу.

З використанням схем навантаження та динамічних моделей (див. рис. 10) були складені рівняння математичних моделей процесів віброударного зневоднення, що зв'язують фізико-механічні характеристики відходів, конструктивні параметри обладнання з параметрами ефективності. Зокрема, рівняння для визначення зусиль  $F_{mzI}(t)$ ,  $F_{mzII}(t)$  та зусилля  $F_{mz\Sigma}(t)$  двостороннього навантаження порції відходів відносно осі  $z$ , на I-му етапі циклу ГПІ можна записати у вигляді

$$\begin{aligned}
 F_{mzI}(t) &= (\Delta p_{y\partial II} + p_3) \cdot S_2 - m_I(\ddot{z}_I + g) - (\alpha_z + \alpha_{mz} + \alpha_{pz}) \times \\
 &\times (\dot{z}_I - \dot{z}_{II}) - c_y(z_I + z_{0y}) - (c_{mz} + c_{pz})(z_I - z_{II}) - \sigma_{0z} - F_k; \\
 F_{mzII}(t) &= m_{II}(g + \ddot{z}_{II}) + (\alpha_{\partial,z} + \alpha_{mz} + \alpha_{pz})(\dot{z}_{II} - \dot{z}_I) + \\
 &+ (c_{mz} + c_{pz})(z_{II} - z_I) + R_{\partial,z} \text{sign}(\dot{z}_{II} - \dot{z}_I) + \sigma_{0z} + P_{cm} + F_k; \\
 F_{mz\Sigma}(t) &= F_{mzI}(t) + F_{mzII}(t); t_n + t_{i1} < t \leq t_I,
 \end{aligned} \quad (2)$$

де  $S_2$  – площа поперечного перерізу плунжера гідроциліндра ГПІ;  $t_n$  – тривалість проходження першої від початку I-го етапу ударної хвилі тиску робочої рідини від вібробудувача до порожнини гідроциліндра ГПІ;  $t_{i1}$  – тривалість збільшення тиску робочої рідини у порожнині гідроциліндра ГПІ від  $p_3$  до  $\Delta p_{y\partial II} + p_3$ ;  $F_k$  – сила, що утримує рідинну фазу відходів у каплях їх твердих частинок;  $z_{0y}$  – попереднє стискання пружин повернення вібростолу.

Рівняння руху твердої і рідинної частинок на I-му етапі відносно осі  $z$

$$\begin{aligned}
 m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} (\ddot{z}_m + g) + \alpha_{mz} \dot{z}_m + c_{mz} z_m + \sigma_{0z} &= F_{mz\Sigma}(t); t_n + t_{i1} < t \leq t_I; \\
 m_p(t) (\ddot{z}_p + g) + \alpha_{pz} \dot{z}_p + c_{pz} z_p + F_k &= F_{mz\Sigma}(t); t_n + t_{i1} < t \leq t_I.
 \end{aligned} \quad (3)$$

Виходячи з діаметра  $d_m$  середньої за розмірами твердої частинки та числа  $n_m$  даних частинок у порції, яке вважаємо незмінним, можна визначити поточне значення середнього діаметру  $d_{к.н}(t)$  рідинного каналу (рідинної частинки) між сусідніми твердими частинками у продовж  $n$ -го циклу навантаження, сумарну довжину  $\Sigma l_{к.н}(t)$  рідинних каналів у порції та масу  $m_{р.н}(t)$  рідинної частинки. При цьому береться до уваги припущення про те, що у зв'язку із періодичним високочастотним та рівномірним перерозподіленням твердих частинок по об'єму прес-форми, величина  $d_{к.н}(t)$  є стабільною для різних ділянок порції. Далі розраховуються: перепад тиску  $\Delta p_m(t)$  у порції, створюваний зусиллям  $F_{мz\Sigma}(t)$ ; втрати тиску  $\Delta p_{м.н}(t)$  і  $\Delta p_{м.р}(t)$  на тертя по довжині  $\Sigma l_{к.н}(t)$  рідинних каналів та в їх розгалуженнях; капілярний тиск  $p_{\sigma l}(t)$  рідини у твердих частинках та перепад тиску  $\Delta p_{з.н}$ , під впливом якого рідина витікає з прес-форми назовні. Обчислюються: поточне значення витрат рідини  $Q_{з.н}(t)$ , що витікає з прес-форми в процесі  $n$ -го циклу віброударного зневоднення, об'єми рідини видаленої у продовж  $n$ -го циклу –  $W_{з.н}$  та під час всього процесу зневоднення –  $\Sigma W_3$ . У зв'язку із обмеженням обсягу автореферату, вищезгадані у даному абзаці залежності не наводяться.

На підставі одержаних за допомогою запропонованих залежностей даних, можуть бути визначені параметри ефективності процесів віброударного зневоднення:  $U_{к}$ ,  $\Pi_{з.р}$  (див. вище), продуктивність  $\Pi_{з.м}$  за зневодненими відходами, енерговитрати  $E_{з.н}$  на реалізацію  $n$ -го циклу зневоднення, загальні енерговитрати –  $\Sigma E_3$  та енергоємність процесу –  $\epsilon_3$

$$U_{к} = \frac{m_m - \Sigma m_m - \rho_p \Sigma W_3}{m_m - \rho_p \Sigma W_3} = 1 - \frac{\Sigma m_m}{m_m - \rho_p \Sigma W_3}; \Pi_{з.р} = \frac{\rho_p \Sigma W_3}{\Sigma T_3}; \Pi_{з.м} = \frac{m_m}{\Sigma T_3};$$

$$E_{з.н} = W_{з.н} \Delta p_{з.н}(t); \Sigma E_3 = \sum_{i=1}^k E_{з.и} = \Sigma T_3 N_{e\Sigma}; \epsilon_3 = \Sigma E_3 / \rho_p \Sigma W_3, \quad (4)$$

де  $\Sigma m_m$  – маса твердої фази порції;  $\Sigma T_3$  – тривалість зневоднення порції;  $N_{e\Sigma}$  – сумарна установлена потужність електродвигунів вібропреса.

З використанням рівнянь (1 – 3) у середовищі Matlab Simulink складена програма, розраховані залежності зміни в часі  $F_{мzI}$ ,  $F_{мzII}$ ,  $F_{мz\Sigma}$ ,  $z_I$ ,  $z_{II}$ ,  $z_p$ ,  $z_{м.нр}$ ,  $z_{м.нл}$ ,  $z_m$ , при віброударному зневодненні концентрату кавового шламу з  $U_n = 75\%$ , на I-му етапі циклу спрацьовування ГПІ (рис. 11). При цьому до рівнянь підставлялись значення конструктивних та робочих параметрів вібропреса моделі ІВПМ-16 (в тому числі, тиск відкриття  $p_l$  віброзбуджувача ГПІ, робочий об'єм  $W_a$  гідроаккумулятора, величини попереднього стискання  $z_{0y}$  пружин вібростолу,  $m_{II}$  та  $P_{cm}$ ), а також визначені експериментально фізико-механічні характеристики кавового шламу, як відходів, що зневоднюються. Аналіз залежностей на рис. 11, зокрема показує, що деформації твердої фази шламу  $z_m$  є на два порядки більшими за стискання  $z_p$  рідинної фази, що обумовлено відповідною різницею коефіцієнтів жорсткості ( $c_{mz}$  і  $c_{pz}$ ). Крім цього,  $z_m$ ,  $z_p$  періодично і високою частотою змінюються за величиною, що обумовлено нелінійним характером зміни зусилля  $F_{мz\Sigma}$  та власними коливаннями частинок порції шламу в області резонансу.

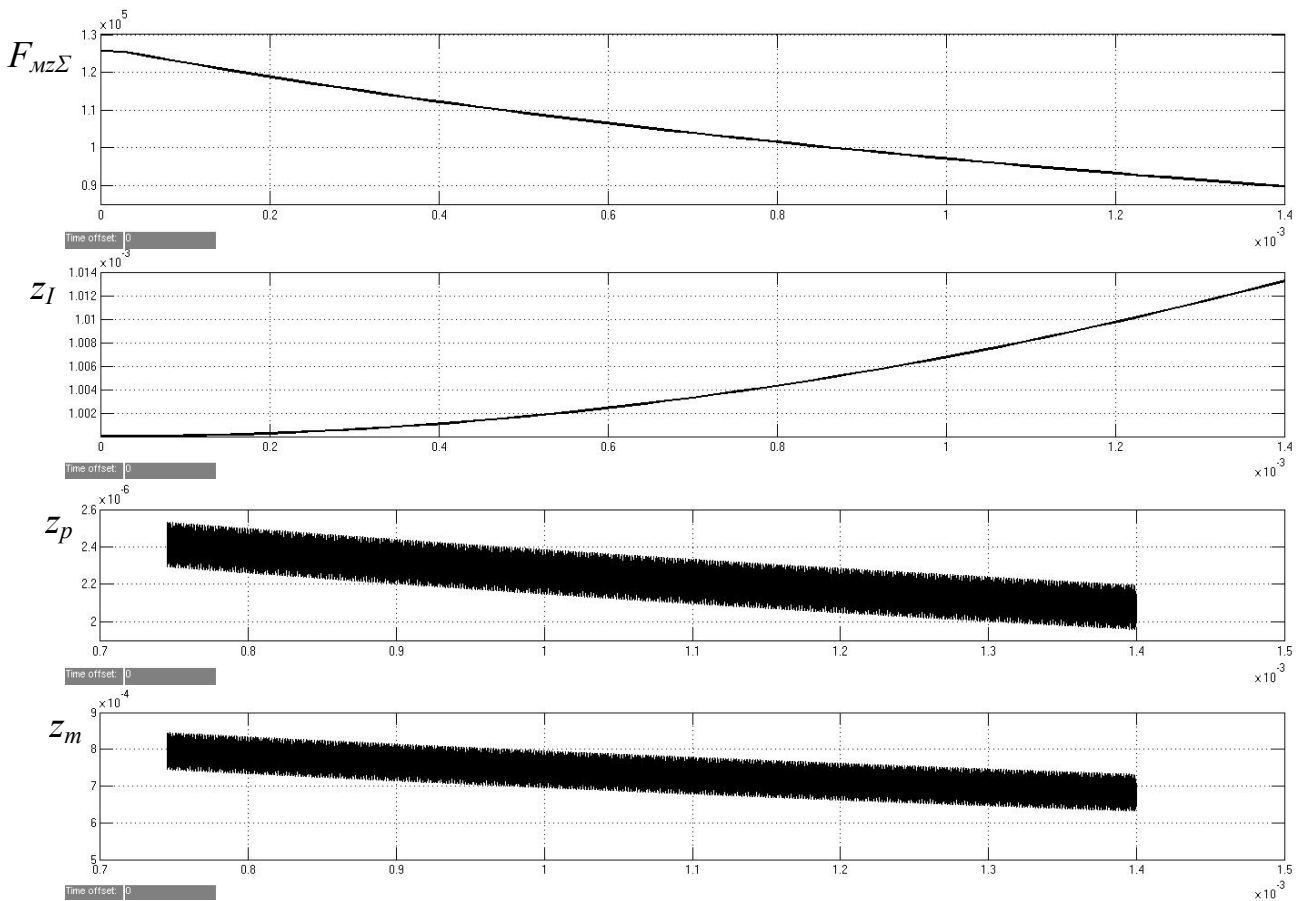


Рис. 11. Розрахункові залежності зміни в часі зусилля  $F_{mz\Sigma}$ , переміщення  $z_l$ , стискування  $z_p$  рідинної фази та деформації  $z_m$  твердої фази харчових відходів (кавового шламу з  $U_n = 75\%$ ), при  $p_1 = 11$  МПа,  $P_{cm} = 15,7$  кН,  $W_a = 2,75 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>,  $z_{0y} = 2$  мм;  $m_{II} = 80$  кг.

Були також розраховані залежності максимальних значень зусилля  $F_{mz\Sigma max}$  від конструктивних та робочого параметрів вібропреса:  $m_{II}$ ,  $W_a$ ,  $z_{0y}$ ,  $p_1$ .

Розроблені схема віброударного інерційного навантаження харчових відходів в процесі їх потокового віброударного фільтрування, а також схеми навантаження і руху дрібнодисперсних твердих частинок цих відходів на різних етапах циклу спрацьовування ГПП установки у осьовому та поперечному перерізах фільтрувальної мембрани. За допомогою даних схем обґрунтована висока ефективність пропонованого способу фільтрування, що обумовлена створенням під час його реалізації у середовищі відходів ударних хвиль напружень і деформацій. Таким чином, забезпечуються періодичні підвищення у 3 – 4 рази тиску у середовищі відходів, а також збільшення швидкості їх руху по каналах мембрани (на 10 – 12% - під час фільтрування спиртової барди). Напруження зсуву, що діють на тверді частинки відходів при проходженні кожної ударної хвилі, забезпечують періодичне і високочастотне руйнування склепінь з частинок на внутрішній поверхні мембрани, зменшення товщини шару осаду на ній та забивання пор мембрани, вищу та стабільнішу в часі продуктивність процесу.

Робочий цикл ГПП установки для потокового віброударного фільтрування, прототипом якої є стенд на рис. 3, може бути розділений на три етапи. На I-му етапі при закритому віброзбудувачі 10 тиск робочої рідини у порожнині гідроциліндра 8 ГПП збільшується від зливного  $p_3$  до максимального

$p_{z1}$ . При цьому виконавчий елемент установки (поршень 6 з вібростолом 7 і плунжером гідроциліндра 8), переміщується вгору, в результаті чого, у середовищі відходів, що циркулюють по каналах мембрани 2, проходить ударна хвиля підвищеного тиску  $p_{mI}$ . На II-му етапі вібробуджувач 10 відкривається, тиск у порожнині гідроциліндра 8 падає до  $p_{z2}$ , виконавчий елемент продовжує уповільнений хід вгору до зупинки, тоді як у середовищі відходів у каналах мембрани 2 проходить хвиля вирівняного тиску  $p_{mII}$ . На III-му етапі тиск у гідроциліндрі 8 змінюється від  $p_{z2}$  до  $p_{z3}$ , в результаті виконавчий елемент повертається у вихідне нижнє положення. У середовищі відходів проходить хвиля зниженого тиску  $p_{mIII}$ .

З використанням динамічних моделей руху та взаємодії твердих і рідинних частинок відходів в процесі їх потокового віброударного фільтрування, а також схем силового навантаження частинок і виконавчого елемента установки для різних етапів циклу спрацьовування її ГПП, були розроблені математичні моделі досліджуваних процесів фільтрування. Останні являють собою диференціальні рівняння руху виконавчого елемента установки, рівняння руху твердої та рідинної частинок відходів у каналах мембрани, а також формули для визначення зусилля  $F_m(t)$ , створюваного виконавчим елементом на частинках відходів на кожному етапі циклу ГПП.

Зусилля  $F_m(t)$  залежить від тиску  $p_m(t)$  у середовищі відходів, що проходять по каналах мембрани. Даний тиск на I-му, II-му, III-му етапах циклу ГПП з високим ступенем наближення може бути визначений за формулами

$$\begin{aligned} p_{mI} &= p_{m.n} + \Delta p_{y.d.max} - \Delta p_{t.f} - \Delta p_{m.vx.n2} - \Delta p_{m.p.n2} - \Delta p_{m.vx.f}; \\ p_{mII} &= p_{m.n} - \Delta p_{y.d.max} / 2 - \Delta p_{t.f} - \Delta p_{m.vx.n2} - \Delta p_{m.p.n2} - \Delta p_{m.vx.f}; \\ p_{mIII} &= p_{m.n} - \Delta p_{t.f} - \Delta p_{m.vx.n2} - \Delta p_{m.p.n2} - \Delta p_{m.vx.f}, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $\Delta p_{y.d.max}$  – максимальне ударне підвищення (зниження) тиску, обумовлене переміщенням виконавчого елемента;  $\Delta p_{t.f}$ ,  $\Delta p_{m.vx.n2}$ ,  $\Delta p_{m.p.n2}$ ,  $\Delta p_{m.vx.f}$  – втрати тиску на тертя за довжиною мембрани 2 (див. рис. 3) та у місцевих опорах між гідроциліндром 8 і мембраною, що розраховуються як

$$\begin{aligned} \Delta p_{y.d.max} &= 2v \cdot z_{Ia} \sqrt{K_m \cdot \rho_{m.t}}; \Delta p_{t.f} = \rho_{m.t} \lambda_{\phi} \frac{l_{\phi}}{d_{\phi} n_k} \frac{v_{mI(II,III)}^2}{2}; \Delta p_{m.vx.n2} = \rho_{m.t} \zeta_{vx.n2} \frac{v_{mI(II,III)}^2}{2}; \\ \Delta p_{m.p.n2} &= \rho_{m.t} \zeta_{p.n2} \frac{v_{mI(II,III)}^2}{2}; \Delta p_{m.vx.f} = \rho_{m.t} \zeta_{vx.f} \frac{v_{mI(II,III)}^2}{2}, \end{aligned} \quad (6)$$

де  $K_m$  – модуль об'ємної пружності рідинної фази відходів, що фільтруються при тиску  $p_{m.n}$ ;  $\rho_{m.t}$  – густина відходів з врахуванням середнього підвищення  $\Delta t_m$  їх температури;  $l_{\phi}$ ,  $d_{\phi}$ ,  $n_k$  – довжина, діаметр та число каналів мембрани;  $\lambda_{\phi}$ ,  $\zeta_{vx.n2}$ ,  $\zeta_{p.n2}$ ,  $\zeta_{vx.f}$  – коефіцієнт гідравлічного тертя у каналах мембрани та коефіцієнти місцевих опорів;  $v_{mI(II,III)}$  – середня швидкість переміщення відходів по каналах мембрани на I-му, II-му, III-му етапах, яку можна визначити за формулами

$$v_{mI} = v_{m0} + v_I = \frac{4 \cdot Q_{H2}}{\pi \cdot d_{\phi}^2 n_k} + 2 \cdot z_{Ia} v; v_{mII} = v_{m0} + \frac{Q_{H1}}{2 \cdot S_2}; v_{mIII} = v_{m0} - v_I; \quad (7)$$

де  $Q_{n1}$ ,  $Q_{n2}$  – подачі насосів 11, 1 (див. рис. 3);  $v_{m0}$  – швидкість переміщення відходів по каналах мембрани 2 до проходження ударної хвилі;  $v_I$  – середня швидкість переміщення виконавчого елемента установки на I-му (III-му) етапах;  $S_2$  – площа плунжера гідроциліндра 8.

Далі можуть бути розраховані: перепад тисків  $\Delta p_{\phi I(II,III)}$ , під впливом якого фільтрат витікає з мембрани; швидкість  $v_{\phi I(II,III)}$  його витікання; витрати  $Q_{\phi I(II,III)}$  та об'єми  $W_{\phi I(II,III)}$  фільтрату, а також витрати енергії  $E_{\phi I(II,III)}$  на здійснення процесу віброударного фільтрування на I-му, II-му, III-му етапах

$$\Delta p_{\phi I(II,III)} = P_{mI(II,III)} - P_z; v_{\phi I(II,III)} = \Delta p_{\phi I(II,III)}^{1-m} / (q \cdot k_o r_{k.o} + R_\phi);$$

$$Q_{\phi I(II,III)} = v_{\phi I(II,III)} S_\phi; W_{\phi I(II,III)} = Q_{\phi I(II,III)} t_{I(II,III)}; E_{\phi I(II,III)} = W_{\phi I(II,III)} \Delta p_{\phi I(II,III)}, \quad (8)$$

де  $q$  – питома продуктивність мембрани (об'єм рідинної фази відходів, що проходить через одиницю площі її поверхні);  $r_{k.o}$  – питомий опір осаду з твердих частинок відходів на внутрішніх поверхнях мембрани (опір шару товщиною 1 м, що відклався на поверхні площею 1 м<sup>2</sup>);  $k_o$  – концентрація осаду (його об'єм у 1 м<sup>3</sup> відходів);  $R_\phi$  – опір фільтрувальної перегородки;  $m$  – показник ступеню, що характеризує стисливість осаду;  $S_\phi$  – площа фільтрувальної поверхні мембрани;  $t_I$ ,  $t_{II}$ ,  $t_{III}$  – тривалість I-го, II-го та III-го етапів циклу спрацьовування ГП.

Отримані за допомогою формул (5 – 8) дані дозволяють визначати параметри ефективності потокового віброударного фільтрування (продуктивність  $Q_\phi$  та енергоємність  $\epsilon_\phi$ ), з врахуванням конструктивних параметрів використовуваного обладнання та фізико-механічних характеристик рідинної фази відходів. При цьому використовуються формули

$$W_{\phi\Sigma} = W_{\phi I} + W_{\phi II} + W_{\phi III}; E_\phi = E_{\phi I} + E_{\phi II} + E_{\phi III}; Q_\phi = W_{\phi\Sigma} / T_u; \epsilon_\phi = E_\phi / W_{\phi\Sigma}, \quad (9)$$

де  $T_u$  – тривалість циклу ГП.

З використанням рівнянь математичних моделей досліджуваних процесів фільтрування, у середовищі Matlab Simulink була складена програма. З її допомогою, з підстановкою до рівнянь моделей фізико-механічних характеристик кавового шламу, як відходів, що фільтруються та параметрів стенду, показаного на рис. 3, розраховані графік зміни на I-му етапі циклу ГП тиску  $p_m$  та залежність  $p_m(p_{z1})$ .

У **п'ятому розділі** розроблені теоретичні основи гідроімпульсного обладнання для віброударного фазового розділення харчових відходів.

Зокрема, представлені структурна схема гідроімпульсного вібропреса для попереднього віброударного зневоднення відходів у прес-формі закритого типу (див. рис. 6), його спрощені динамічні моделі та математичні моделі. Останні являють собою рівняння балансів енергії для різних етапів циклу спрацьовування ГП, рівняння руху та збереження імпульсів виконавчих елементів вібропреса, а також залежності, отримані на підставі положень теорії гідравлічного та механічного удару.

Виконання умови про те, що частота періодичного впливу вібробуджувача на гідромеханічну систему вібропреса  $\nu = t_k^{-1}$  менша її першої резонансної частоти дозволило застосувати під час моделювання “пружну

зосереджену” модель, у якій робоча рідина має в'язкість і стискається, а основні параметри мас, пружних і деформованих елементів розглядаються зведеними.

Рівняння математичних моделей вібропреса дозволяють, виходячи з його конструктивних параметрів ( $m_I$ ,  $m_{II}$ ,  $c_y$ ,  $z_{0y}$ ,  $S_z$  (див. вище), довжин  $l$  та діаметрів  $d$  з'єднувальних гідроліній ГП), параметрів робочої рідини та фізико-механічних характеристик відходів (див. вище), визначати робочі параметри досліджуваного обладнання – граничні швидкості, переміщення та прискорення виконавчих елементів в моменти початку та завершення етапів циклу ГП, тривалості етапів, збільшення тиску  $\Delta p_{y\partial II}$  у порожнині гідроциліндра ГП. У зв'язку із громіздкістю рівнянь математичних моделей вібропреса, вони в авторефераті не наводяться.

За допомогою значень робочих параметрів вібропреса можуть бути розраховані параметри навантаження відходів під час їх віброударного зневоднення (див. вище)

$$p_{z.max} = \Delta p_{y\partial II} + p_z; z_{Ia} = z_{In} + z_{Ie}; \nu = \frac{l}{T_y} = \frac{l}{t_o + t_{n.m}} = \frac{l}{t_e + t_{n.m} + t_{n.m}}, \quad (10)$$

де  $z_{In}$ ,  $z_{Ie}$  – переміщення маси  $m_I$  на I-му та II-му етапах циклу спрацьовування ГП (див. вище);  $T_y$  – тривалість циклу спрацьовування ГП;  $t_e$  – швидкодія вібробуджувача;  $t_{n.m}$  – тривалість закриття основного каскаду вібробуджувача.

З використанням рівнянь математичних моделей та формул (10) була складена комп'ютерна Excel-програма, розраховані і побудовані залежності параметрів навантаження від конструктивних та робочих параметрів вібропреса моделі ІВПМ-16, при зневодненні на ньому концентрату кавового шламу з  $U_n = 75\%$  (залежності, розраховані для процесів віброударного зневоднення на тих самих режимах концентратів спиртової барди та бурякового жому, виявились цілком відповідними). Аналіз цих залежностей показує, що на  $p_{z.max}$  найбільше впливають  $z_{0y}$  (зі збільшенням якого  $p_{z.max}$  падає) та  $p_I$  (з підвищенням якого  $p_{z.max}$  зростає). Частота  $\nu$  помітно залежить лише від  $W_a$  та  $p_I$ , при збільшенні яких вона зменшується. Амплітуда  $z_{Ia}$  найкраще регулюється при зміні  $m_{II}$ ,  $z_{0y}$  та  $p_I$ : з підвищенням  $m_{II}$  та  $z_{0y}$  амплітуда  $z_{Ia}$  падає, а зі збільшенням  $p_I$  – зростає.

Також у розділі наведені узагальнена та розгорнута структурні схеми, загальні багатомасові та спрощені динамічні моделі гідроімпульсної установки для потокового віброударного фільтрування вологих дисперсних відходів харчових виробництв, прототипом якої є стенд, показаний на рис. 3.

На рисунках 12, 13 представлені узагальнена структурна схема та одна зі спрощених динамічних моделей установки. На останній позначені (див. також рис. 12):  $m_I$  – маса виконавчого елемента установки (включає маси плунжера гідроциліндра 13, вібростолу 14 та поршня гідроциліндра 11);  $m_{зв.р}$  – зведена до перерізу  $S_z$  плунжера гідроциліндра 13 маса робочої рідини у підсистемі набору тиску (ПНТ), що містить гідролінію 5, розподільну порожнину 6 та порожнину гідроциліндра 13 ГП;  $m_{зв.м}$  – зведена до перерізу  $S_{d.z}$  поршня гідроциліндра 11 маса відходів у фільтрувальній підсистемі (ФП), до якої входять поршнева порожнина гідроциліндра 11, розподільна порожнина 12, канали мембрани 3 та

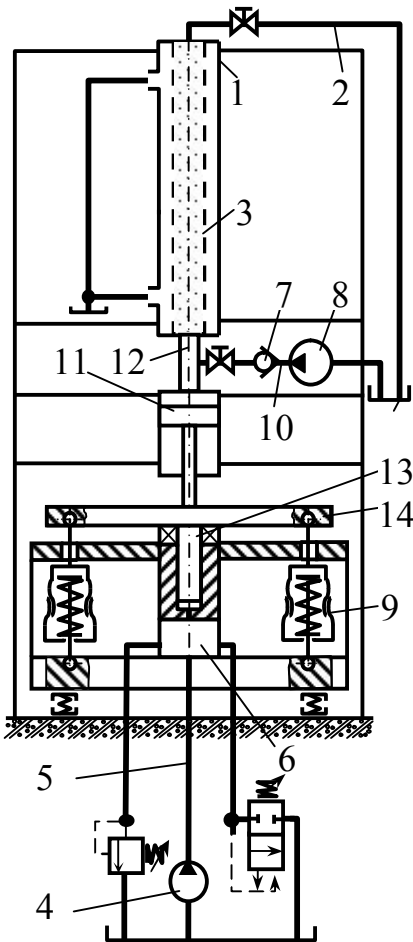


Рис. 12. Узагальнена структурна схема гідроімпульсної установки для потокового віброударного фільтрування харчових відходів: 1 - корпус фільтрувальної мембрани; 2, 5, 10 - гідролінії; 3 - мембрана; 4, 8 - насоси; 6, 12 - розподільні порожнини; 7 - зворотний клапан; 9 - пружини повернення вібростолу; 11, 13 - гідроциліндри; 14 - вібростіл.

гідролінія 2;  $m_{3M}$  - зведена до перерізу  $f_3$  маса відходів у гідролінії 10 довжиною  $l_3$ ;  $z_{3в.р}$ ,  $v_{3в.р}$ ,  $z_I$ ,  $v_I$ ,  $z_{3в.м}$ ,  $v_{3в.м}$ ,  $z_{3M}$ ,  $v_{3M}$  - поточні координати переміщення і поточні швидкості мас  $m_{3в.р}$ ,  $m_I$ ,  $m_{3в.м}$ ,  $m_{3M}$ ;  $\lambda_{3в.ГП}$ ,  $\lambda_{3в.ф}$  - зведені коефіцієнти гідравлічного тертя у ПНТ та ФП;  $\lambda_3$  - коефіцієнт гідравлічного тертя у гідролінії 10;  $\zeta_{3в.ГП}$ ,  $\zeta_{3в.ф}$ ,  $\zeta_{3в3}$  - зведені коефіцієнти опору ПНТ, ФП та гідролінії 10;  $K_{3в.ГП}$ ,  $K_{3в.ф}$ ,  $K_3$  - зведені модулі об'ємної пружності стінок гідроліній і порожнин ПНТ, ФП та гідролінії 10;  $K_{p1}$ ,  $K_{p2}$ ,  $K_{p3}$  - зведені модулі об'ємної пружності робочої рідини у ПНТ при тисках  $p_{21}$ ,  $p_{22}$ ,  $p_3$ ;  $c_y$ ,  $c_{3.к}$  - жорсткість пружин 9 повернення вібростолу та мембрани зворотного клапану 7;  $c_m$  - жорсткість відходів відносно осі  $z$  (враховує коефіцієнти жорсткості їх твердої -  $c_{mz}$  та рідинної -  $c_{pz}$  фаз (див. рис. 9));  $\alpha_I$  - коефіцієнт в'язкого демпфірування в з'єднаннях плунжера 13 та поршня 11;  $\alpha_{mI}$ ,  $\alpha_{mII}$ ,  $\alpha_{m.н}$  - коефіцієнти в'язкого демпфірування відходів відносно осі  $z$  при тисках  $p_{mI}$ ,  $p_{mII}$ ,  $p_{m.н}$  (враховують коефіцієнти демпфірування твердої -  $\alpha_{mz}$  та рідинної -  $\alpha_{pz}$  фаз відходів (див. рис. 9));  $\alpha_{3.к}$  - коефіцієнт демпфірування в з'єднаннях рухомих частин зворотного клапану;  $\sigma_m$  - коефіцієнт, що враховує текучість твердої фази відходів  $\sigma_m = \sigma_{0z}$ ;  $R_{д.з}$  - постійна складова зведених сил сухого тертя в ущільненнях гідроциліндра 11;  $E_{к.н1}$ ,  $E_{к.н2}$  - кінетична енергія робочої рідини, яка надходить від насосів 4, 8 з подачами  $Q_{н1}$ ,  $Q_{н2}$ ;  $t_e$  - тривалість розглядуваного етапу.

За допомогою динамічних моделей були

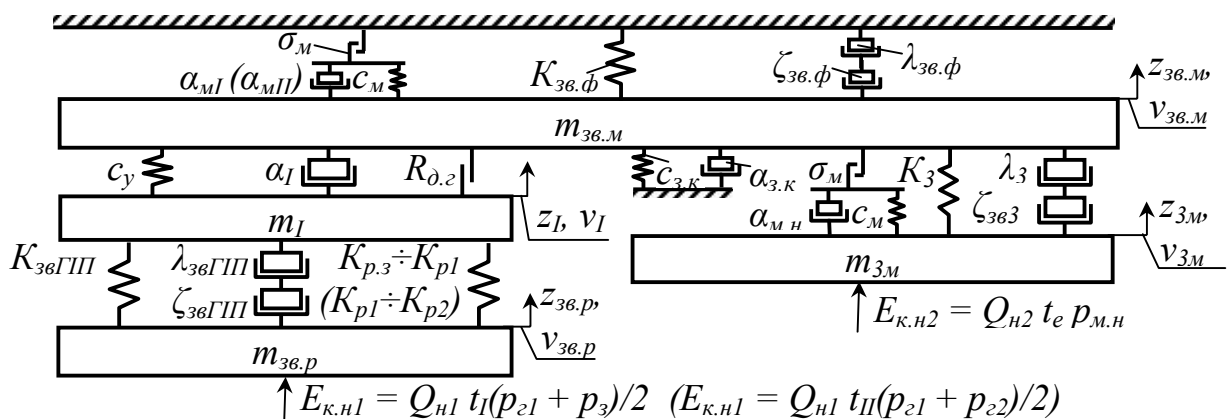


Рис. 13. Спрощена динамічна модель гідроімпульсної установки для потокового віброударного фільтрування вологих дисперсних відходів для I-II-го етапів циклу спрацьовування ГП.

складені математичні моделі установки, що являють собою рівняння енергетичного балансу та рівняння руху її виконавчого елемента на I – III-му етапах циклу спрацювання ГПІ. Зокрема, рівняння балансів енергії для I-го етапу має вигляд (див. рис. 12, 13)

$$E_{к.н1} + E_{к.н2} = E_{к.зв.р} + E_{кI} + E_{к.зв.м} + E_{н.зв.р} + E_{нI} + E_{н.у} + E_{н.зв.м} + E_{к.с.т.д} + \\ + E_{к.н.д.м} + E_{к.в.мI} + E_{к.в.т.м} + E_{\phi} + E_{к3м} + E_{н3м} + E_{н.з.к} + E_{к.в.т.з.к} + E_{к.в.т.м3} + E_{к.н.д3м}, \quad (11)$$

де  $E_{к.зв.р}$ ,  $E_{кI}$ ,  $E_{к.зв.м}$ ,  $E_{к3м}$  – кінетична енергія переміщення мас  $m_{зв.р}$ ,  $m_I$ ,  $m_{зв.м}$ ,  $m_{3м}$ ;  $E_{н.зв.р}$ ,  $E_{н.зв.м}$ ,  $E_{н3м}$  – потенціальна енергія стискання робочої рідини у ПНТ, стискання відходів у ФП та у гідролінії 10 довжиною  $l_3$ , а також деформування стінок даних підсистем і гідролінії;  $E_{нI}$  – потенціальна енергія підйому маси  $m_I$ ;  $E_{н.у}$  – потенціальна енергія стискання пружин 9;  $E_{к.в.мI}$ ,  $E_{к.в.т.з.к}$  – робота в'язкого тертя при переміщенні плунжера гідроциліндра 13 і поршня гідроциліндра 11, а також мембрани зворотного клапана 7;  $E_{к.с.т.д}$  – робота сил сухого тертя в ущільненнях штока гідроциліндра 11;  $E_{к.в.т.м}$ ,  $E_{к.в.т.м3}$  – робота сил в'язкого тертя при переміщенні відходів у ФП та у гідролінії 10;  $E_{к.н.д.м}$ ,  $E_{к.н.д3м}$  – робота пластичного деформування твердих частинок відходів у ФП та у гідролінії 10;  $E_{\phi}$  – робота з фільтрування – енергія, що витрачається на витискання рідинної фази відходів через канали осаду з твердих частинок на внутрішніх поверхнях мембрани та через пори у її стінках;  $E_{н.з.к}$  – потенціальна енергія деформування мембрани зворотного клапана 7.

Формули для визначення складових у рівнянні (11) записуються як

$$E_{к.н1} = \frac{Q_{н1} \cdot t_{н.м} (p_{z1} + p_3)}{2}; \quad E_{к.н2} = Q_{н2} \cdot t_{н.м} \cdot p_{м.н}; \quad E_{к.зв.р} = \frac{m_{зв.р} v_{зв.р}^2}{2} (1 + \lambda_{зв.ГПІ} + \zeta_{зв.ГПІ}); \\ E_{кI} = \frac{m_I v_I^2}{2}; \quad E_{к.зв.м} = \frac{m_{зв.м} v_{зв.м}^2}{2} (1 + \lambda_{зв.ф} + \zeta_{зв.ф}); \quad E_{к3м} = \frac{m_{3м} v_{3м}^2}{2} (1 + \lambda_3 + \zeta_{зв3}); \\ E_{н.зв.р} = \frac{(p_{z1}^2 - p_3^2) (l_1 f_1 + l_{н1} f_{н1}) (K_{зв.ГПІ} + K_{р.ср})}{2 \cdot K_{зв.ГПІ} K_{р.ср}}; \quad E_{н.у} = \frac{c_y \cdot (z_{0y} + z_{In})^2}{2}; \\ E_{н3м} = \frac{c_m (v_{3м} t_{н.м})^2}{2} + \frac{p_{м.н}^2 l_3 f_3}{2 \cdot K_3} = \frac{(c_{mz} + c_{pz}) (v_{3м} t_{н.м})^2}{2} + \frac{p_{м.н}^2 l_3 f_3}{2 \cdot K_3}; \quad E_{н.з.к} = \frac{c_{з.к} \cdot z_{з.к}^2}{2}; \\ E_{н.зв.м} = \frac{c_m z_{In}^2}{2} + \frac{(p_{мI}^2 - p_{м.н}^2) (l_{н.д} S_{д.д} + l_{н2} f_{н2} + l_{\phi} f_{\phi} + l_4 f_4)}{2 \cdot K_{зв.ф}}; \quad E_{нI} = m_I \cdot g \cdot z_{In}; \\ E_{к.в.мI} = \alpha_I \cdot v_I \cdot z_{In}; \quad E_{к.в.т.з.к} = \alpha_{з.к} \cdot v_{3м} \cdot z_{з.к}; \quad E_{к.с.т.д} = R_{д.д} z_{In} = 0,1 \cdot S_{д.д} z_{In} (p_{z1} + p_3) / 2; \\ E_{к.н.д.м} = \sigma_m z_{In}; \quad E_{к.н.д3м} = \sigma_m v_{3м} t_{н.м}; \quad E_{к.в.т.м3} = \alpha_m v_{3м} v_{3м} t_{н.м} = (\alpha_{mz} + \alpha_{pz}) v_{3м}^2 t_{н.м}; \\ E_{к.в.т.м} = (\alpha_{mz} + \alpha_{pz}) \left( v_I + \frac{Q_{н1} + Q_{н2}}{f_{н2}} + \frac{Q_{н1} + Q_{н2}}{f_{\phi}} + \frac{Q_{н1} + Q_{н2}}{f_4} \right) \cdot z_{In}, \quad (12)$$

де  $l_1, f_1, l_4, f_4, l_{н1}, f_{н1}, l_{н2}, f_{н2}$  – довжини та площі поперечного перерізу гідроліній 5, 2 та розподільних порожнин 6, 12;  $l_{д.д}$  – довжина поршневої порожнини гідроциліндра 11;  $K_{р.ср}$  – середня величина адіабатного модуля об'ємної пружності робочої рідини у ПНТ при зміні тиску від  $p_3$  до  $p_{z1}$ ;  $z_{0y}$  – попереднє

стискання пружин 9;  $z_{3.k}$  – переміщення мембрани зворотного клапана 7;  $z_{In}$  – переміщення маси  $m_I$  на I-му етапі;  $v_{36.p}$ ,  $v_{36.m}$ ,  $v_I$ ,  $v_{3M}$  – середні швидкості переміщення мас  $m_{36.p}$ ,  $m_{36.m}$ ,  $m_I$ ,  $m_{3M}$  на I-му етапі;  $t_{n.m} = t_I$  – тривалість I-го етапу, яку обчислюємо за формулою

$$t_{n.m} = p_{z1} W_{ГП} / Q_{н1} K_{36ГП}, \quad (13)$$

де  $W_{ГП}$  – об'єм ПНТ.

З рівнянь (11, 12) можна визначити переміщення  $z_{In}$ , а розв'язуючи рівняння балансів енергії та рівняння руху виконавчого елемента для II-го і III-го етапів циклу спрацьовування ГП – одержати дані, необхідні для розрахунку параметрів навантаження:  $z_{Ia}$ ,  $v$  та  $p_{m.max}$ , що визначаються як

$$z_{Ia} = z_{In} + z_{Ie}; \quad v = l / (t_{n.m} + t_{n.m}); \quad p_{m.max} = p_{m1}, \quad (14)$$

де  $z_{Ie}$  – переміщення маси  $m_I$  на II-му етапі циклу;  $t_{n.m}$  – тривалість падіння тиску робочої рідини у ПНТ на II-III-му етапах.

З використанням рівнянь математичних моделей установки для потокового віброударного фільтрування була складена ще одна комп'ютерна Ексел-програма. За допомогою останньої, для конструктивних і робочих параметрів стенда – прототипу досліджуваної установки (див. рис. 3), а також для фізико-механічних характеристик кавового шламу, як фільтрованих відходів, були розраховані і побудовані залежності:  $z_{Ia} - z_{0y}$ ,  $z_{Ia} - p_{z1}$ ,  $v - p_{z1}$ ,  $v - f_{dp.в}$  та  $p_{m.max} - p_{z1}$  (залежності, розраховані для віброударного фільтрування на аналогічних режимах спиртової барди та бурякового жому є адекватними залежностям для кавового шламу). Їх аналіз показав: при збільшенні  $z_{0y}$  амплітуда  $z_{Ia}$  помітно падає, а під час підвищення  $p_{z1}$  – зростає; нарощування  $p_{z1}$  призводить до падіння  $v$ , а збільшення площі  $f_{dp.в}$  прохідного перерізу дроселя вібробудувача – до зростання  $v$ ; при збільшенні  $p_{z1}$  тиск  $p_{m.max}$  падає.

У шостому розділі експериментально доведена коректність розроблених у попередніх розділах теоретичних положень процесів віброударного фазового розділення вологих дисперсних відходів та гідроімпульсного обладнання для їх реалізації, в тому числі коректність запропонованих математичних моделей.

З цією метою, на базі ІВПМ-16 був створений ще один гідроімпульсний стенд – прототип вібропреса для попереднього віброударного зневоднення харчових відходів у прес-формі закритого типу (див. рис. 6). Під час експериментів зі зневоднення на стенді кавового шламу, бурякового жому та спиртової барди визначались: переміщення  $z_I$  нижнього виконавчого елемента стенда (вібростолу), тиск  $p_a$  робочої рідини у акумуляторній гідролінії ГП, тиск  $p_2$  у порожнині гідроциліндра ГП та зусилля  $F_{mz\Sigma}$  двостороннього віброударного навантаження порції відходів у прес-формі. При цьому для контролю  $p_a$  і  $p_2$  використовувались тензометричні датчики тиску моделей ADZ-SML-10.0 і KOBOLD SEN 8701-165, для вимірювання  $F_{mz\Sigma}$  – тензометричний датчик моделі EMS70, для визначення  $z_I$  – тензометричний датчик моделі TURCK Ni8-M18-LiU. Сигнали від датчиків надходили на аналого-цифровий перетворювач моделі E14-140. Отримувані за допомогою пакета прикладних програм LGraph2 осцилограми, виводились на монітор комп'ютера. На рис. 14 представлені одержані в результаті досліджень

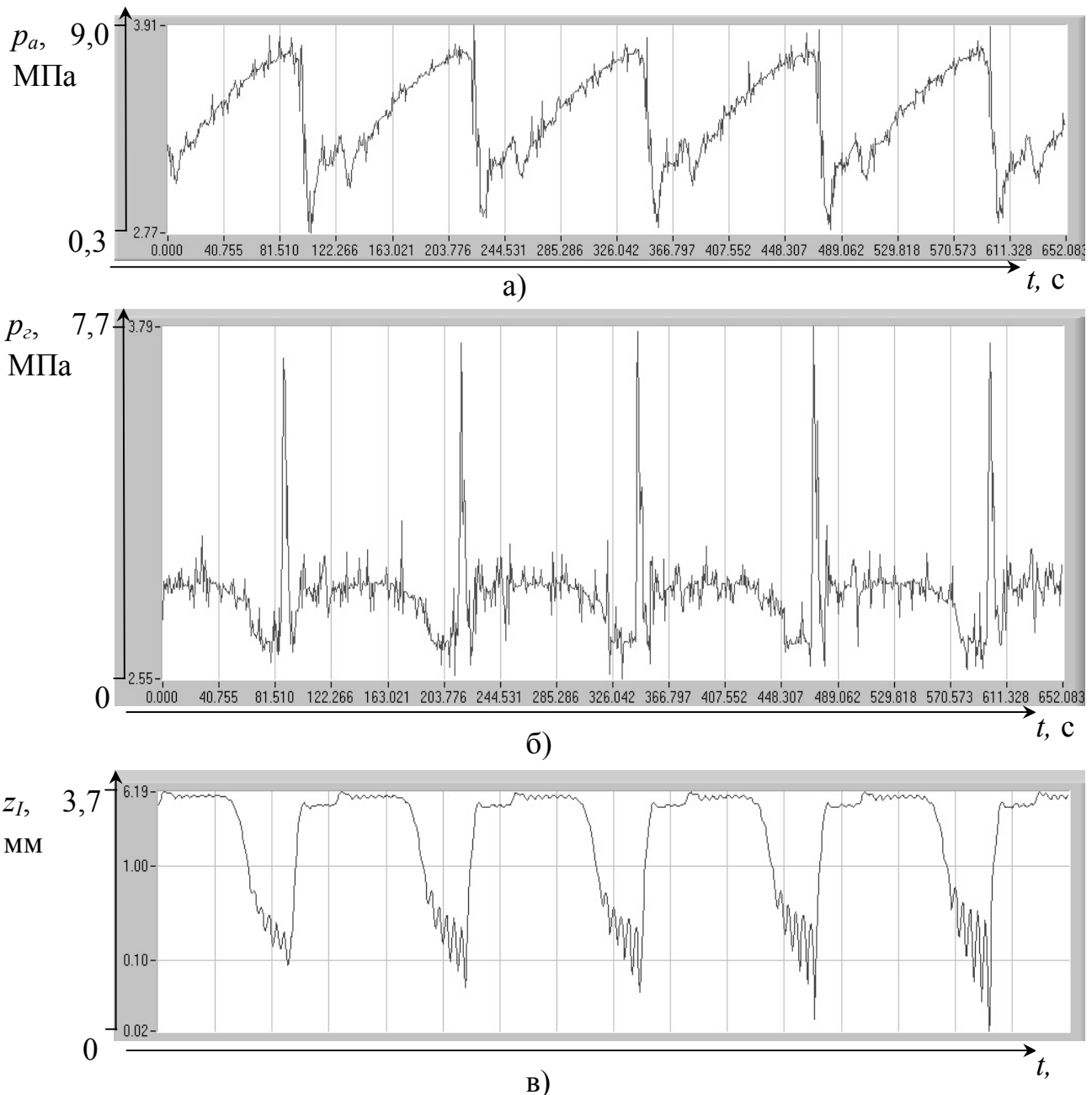


Рис. 14. Осцилограми зміни: а - тиску  $p_a$  робочої рідини у акумуляторній гідролінії; б - тиску  $p_z$  робочої рідини у гідроциліндрі ГПІ; в - переміщення  $z_l$  вібростолу експериментального гідроімпульсного стенда при віброударному зневодненні на ньому порції концентрату кавового шламу.

осцилограми вказаних вище параметрів, які при зневодненні на одних і тих самих режимах концентратів кавового шламу, бурякового жому та спиртової барди, є адекватними. Результуюча середня квадратична похибка вимірювань не перевищувала 5,2%. Кількість необхідних вимірювань-записів для кожного з досліджуваних режимів, визначена за формулами теорії ймовірностей, складала не менше 9.

На рис. 15 зіставлені деякі відповідні розрахункові та експериментальні графіки залежностей зусилля  $F_{mz\Sigma max}$  та параметрів навантаження відходів ( $z_{la}$ ,  $v$ ,  $p_{z,max}$ ) під час їх віброударного зневоднення від конструктивних та робочих параметрів гідроімпульсних вібропреса та стенда. Розрахункові залежності

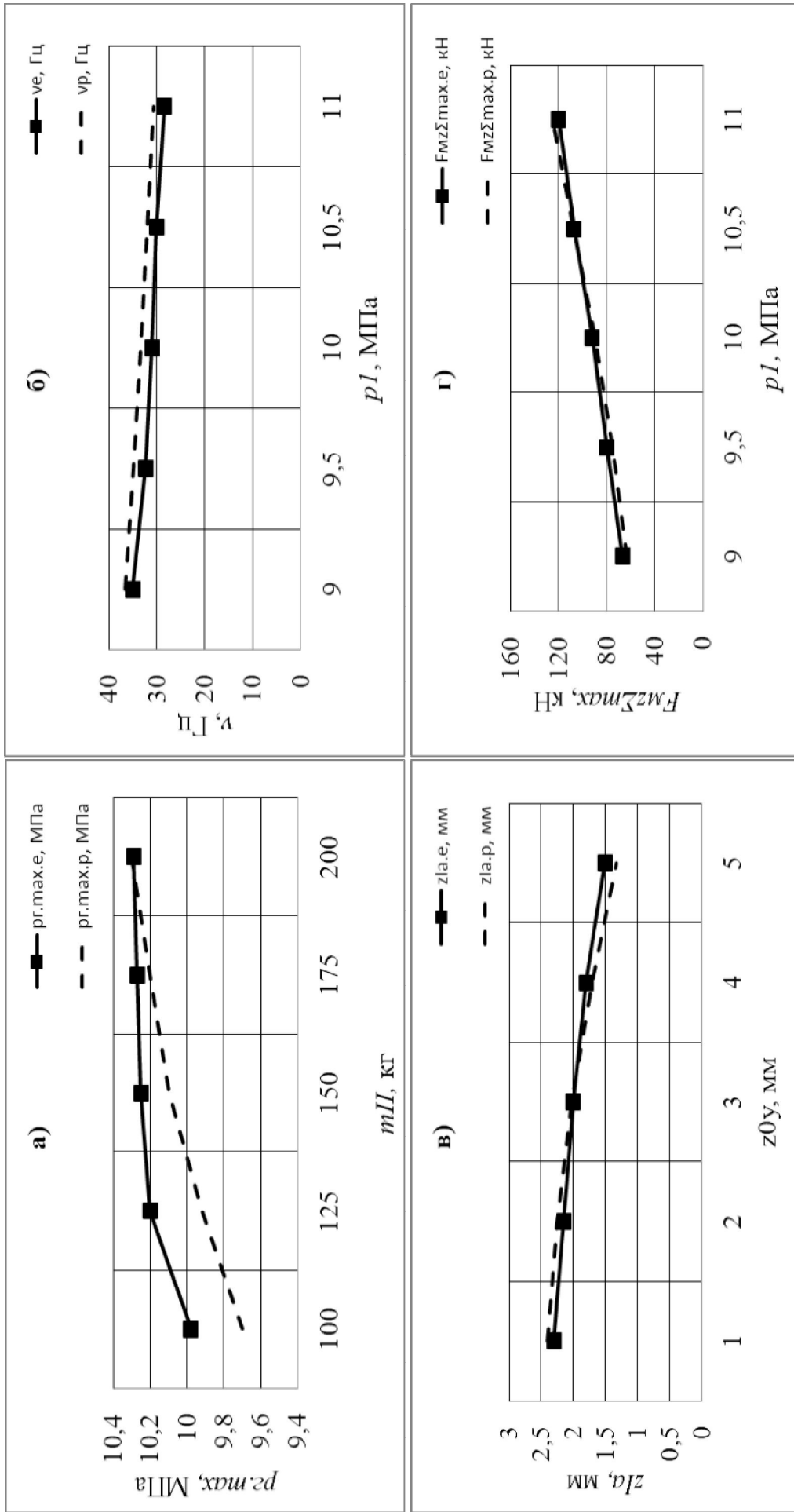


Рис. 15. Зіставлення розрахункових та експериментальних залежностей параметрів гідроімпульсних вібропреса та стенда для віброударного зневоднення: а – максимального тиску  $p_{2,max}$  у порожнині гідроциліндра ГПП від маси тл верхнього виконавчого елемента гідроімпульсного вібропреса, при  $p_1 = 11$  МПа,  $P_{cm} = 4$  кН,  $W_a = 2 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>,  $z_{0y} = 1$  мм; б – частоти у коливень вібростолю від тиску  $p_1$  відкриття вібробуджувача, при  $z_{0y} = 1$  мм,  $P_{cm} = 4$  кН,  $W_a = 2 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>,  $m_{II} = 100$  кг; в – амплітуди  $z_{la}$  коливень вібростолю від попереднього стискання  $z_{0y}$  пружин його повернення, при  $P_{cm} = 4$  кН,  $W_a = 2,75 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>,  $p_1 = 11$  МПа,  $m_{II} = 100$  кг; г – зусилля  $F_{mz,max}$  двостороннього навантаження порції відходів від  $p_1$ , при  $P_{cm} = 4$  кН,  $W_a = 2 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>,  $z_{0y} = 1$  мм,  $m_{II} = 100$  кг; вологі дисперсні відходи – концентрат кавового шלאму, буряковий жом та спиртова барда з  $U_n = 75\%$ .

отримані за допомогою рівнянь математичних моделей досліджуваних процесів і обладнання та комп'ютерних Matlab- і Excel-програм (див. вище). Експериментальні залежності одержані з осцилограм, знятих під час досліджень на стенді (див. рис. 14). Максимальна відносна величина розбіжностей  $\delta$  між відповідними розрахунковими і експериментальними значеннями (див. рис. 15) не перевищувала 11,3%, що задовольняє умовам перевірних розрахунків та доводить коректність розроблених моделей.

Експериментальна перевірка коректності моделей гідроімпульсної установки для потокового фільтрування здійснювалась за допомогою стенду, показаного на рис. 3. Під час експериментів з ним за допомогою описаних вище апаратури, методів та програмного забезпечення визначались: тиск  $p_2$  робочої рідини у порожнині гідроциліндра 8 ГП (див. рис. 3), переміщення  $z_I$  вібростолу 7 та максимальний тиск  $p_{m.max}$  у середовищі відходів (кавового шламу, спиртової барди та бурякового жому) у каналах мембрани 2 – контролювався пружинним манометром 9 класу точності 1,5, з ціною поділки шкали 0,01 МПа і максимальним її значенням 10 МПа. З використанням осцилограм при різних значеннях конструктивних та робочого параметрів стенду побудовані експериментальні залежності, які для трьох вищевказаних видів відходів при відповідних режимах їх навантаження не відрізнялись одна від одної. Деякі з цих залежностей зіставлені на рис. 16 з відповідними розрахунковими залежностями (див. вище). На рис. 16, в графік  $p_{m.max.mM} = f(p_{21})$ , розрахований з використанням Matlab-програми, показаний штрих-пунктирною

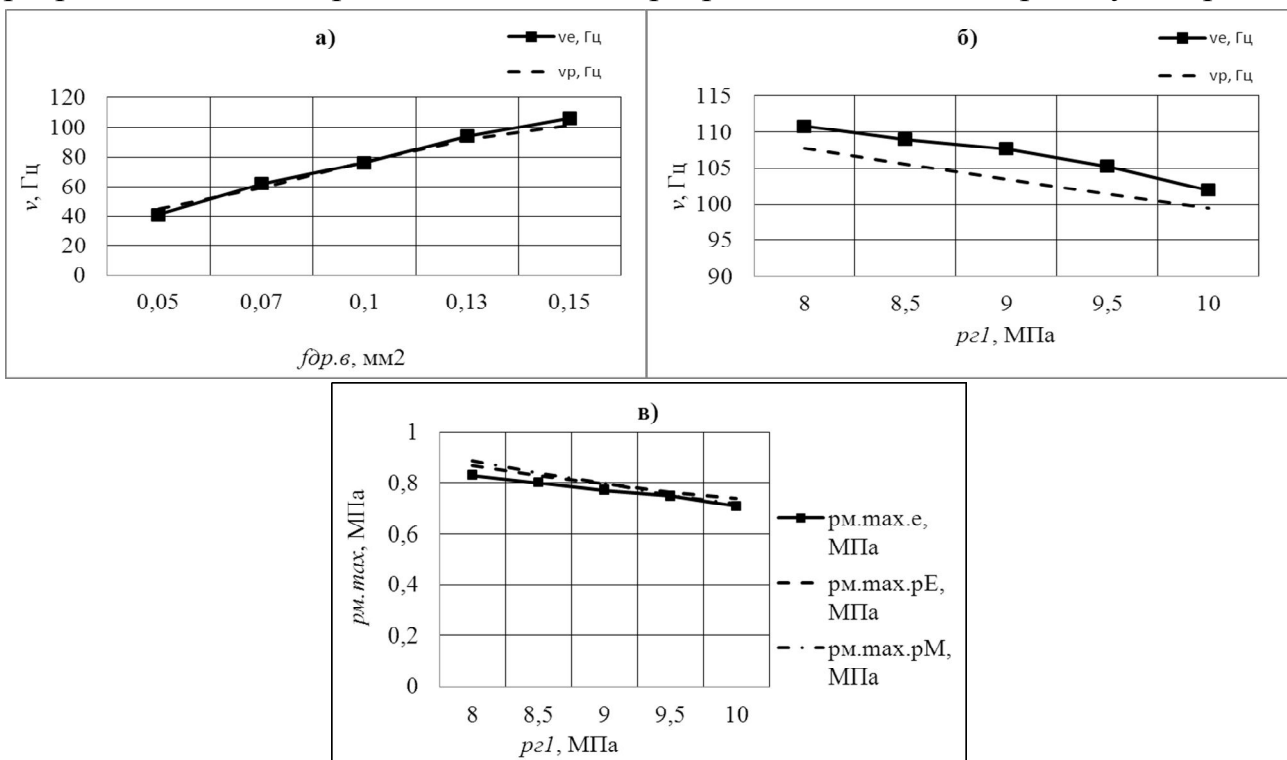


Рис. 16. Зіставлення розрахункових та експериментальних залежностей параметрів гідроімпульсних установки і стенду для віброударного фільтрування: а – частоти  $\nu$  від площі  $f_{др.в}$  прохідного перерізу дроселя вібробуджувача, при  $p_{21} = 9,5$  МПа,  $z_{0y} = 4$  мм; б – амплітуди  $z_{Ia}$  від максимального тиску  $p_{21}$ , при  $f_{др.в} = 0,15$  мм<sup>2</sup>,  $z_{0y} = 4$  мм; в - максимального тиску  $p_{m.max}$  від  $p_{21}$ , при  $z_{0y} = 4$  мм,  $f_{др.в} = 0,15$  мм<sup>2</sup>; відходи – рідинна фаза кавового шламу, бурякового жому та спиртової барди з дрібнодисперсними твердими частинками.

лінією, а графік  $p_{m.max.mE} = f(p_{z1})$ , розрахований за допомогою Excel-програми – штриховою лінією. При цьому максимальна відносна величина розбіжностей не перевищувала  $\delta = 10\%$ , що доводить адекватність розроблених моделей реальним процесам та обладнанню.

У **сьомому розділі** з використанням рівнянь і залежностей математичних моделей процесів і обладнання для віброударного фазового розділення вологих дисперсних відходів, розроблена методика розрахунку даного обладнання, представлені його перспективні схеми та рекомендації з практичного впровадження на виробництві.

Так, під час розрахунку гідроімпульсного вібропреса для попереднього віброударного зневоднення на базі ІВПМ (див. рис. 6), як вихідні дані використовуються: добова маса  $m_{m.d}$  вологих дисперсних відходів, що мають бути зневодненими на проектуваному вібропресі, на даному конкретному підприємстві; загальна тривалість  $\Sigma T_{z.d}$  роботи вібропреса у продовж доби; оптимальна тривалість  $\Sigma T_{z.o}$  попереднього віброударного зневоднення порції відходів; параметри навантаження:  $p_{z.max}$ ,  $v$ ,  $z_{1a}$  (див. вище),  $\Delta p_{m.max}$  (максимальний перепад тиску у середовищі порції відходів); параметри віброзбуджувача ГП:  $p_1$ ,  $p_2$  (тиск закриття),  $t_o$ ,  $t_b$ ; параметри робочої рідини ГП: густина  $\rho_{p,p}$ , модуль об'ємної пружності  $K_{p,p}$ , процентний вміст рідинної –  $W_p$  та газової –  $W_z$  фаз, рівень  $h_b$  рідини у баку, підвищення її робочої температури –  $\Delta t_p$ ; параметри відходів:  $\rho_m$  (густина),  $c_{mz}$ ,  $c_{pz}$ ,  $\alpha_{mz}$ ,  $\alpha_{pz}$ ,  $\sigma_{0z}$ ; ширина  $B_e$  вібростолу базового вібропреса.

В результаті розрахунку, більша частина якого має перевірний характер, визначаються такі основні параметри вібропреса як: розміри та маса  $m_{n.f}$  прес-форми 8 (див. рис. 6); діаметр  $d_z$  плунжера гідроциліндра 10 ГП; жорсткість  $c_y$  пружин 23 повернення вібростолу; подача  $Q_{n1}$  насоса ГП; потужність  $N_{el}$  електродвигуна ГП.

На першому етапі розрахунку обчислюються внутрішні  $B_{n.f.в}$ ,  $H_{n.f.в}$  та зовнішні  $B_{n.f.з}$ ,  $H_{n.f.з}$  ширина і висота прес-форми (найбільш оптимальною є прес-форма квадратного поперечного перерізу), ширина  $B_o$  і висота  $H_o$  вхідного і вихідного отворів у ній для подачі та відведення відходів (див. рис. 6), маса  $m_{n.f}$ . При цьому використовуються формули

$$\begin{aligned} n_{n.d} &= \Sigma T_{z.d} / 2 \cdot \Sigma T_{z.o}; \quad m_m = m_{m.d} / n_{n.d}; \quad B_{n.f.з} = 0,96 \cdot B_e; \quad B_{n.f.в} = B_o = 0,94 \cdot B_e; \\ B_m &= B_{n.f.в}; \quad H_m = m_m / \rho_m B_{n.f.в}^2; \quad H_o = H_m; \quad H_{n.f.в} = H_o + 0,03m; \quad H_{n.f.з} = 1,04 \cdot H_{n.f.в}; \\ m_{n.f} &= (B_{n.f.з}^2 H_{n.f.з} - B_{n.f.в}^2 H_{n.f.в}) \rho_{cm}, \end{aligned} \quad (15)$$

де  $n_{n.d}$  – число порцій зневоднених на вібропреса у продовж доби;  $m_m$  – маса порції;  $B_m$ ,  $H_m$  – ширина та висота порції;  $\rho_{cm}$  – густина матеріалу прес-форми (сталь).

Далі визначається необхідна максимальна подача насоса ГП

$$Q_{n1max} = \frac{W_{a.o} (p_1 - p_2) v}{(1 - v \cdot t_o) K_{зв.a.o}}, \quad (16)$$

де  $W_{a.o}$  – об'єм ГП, що акумулює;  $K_{зв.a.o}$  – зведений модуль його об'ємної пружності.

Маси нижнього  $m_I$  та верхнього  $m_{II36}$  виконавчих елементів вібропреса визначаються за формулами

$$m_I = m_z + m_e + m_{n.\phi} + m_m; \quad m_{II36} = m_{II} + \frac{1}{3} \rho_{p.p.t} \cdot S_z^2 \left( \frac{W_{n.d}}{S_{\partial.z}^2} + \frac{l_4}{f_4} + \frac{l_3}{f_3} \right), \quad (17)$$

де  $m_z, m_e$  – маси плунжера гідроциліндра 10 ГП та вібростолу 9 базового ІВПМ (див. рис. 6);  $\rho_{p.p.t}$  – густина робочої рідини з врахуванням середнього підвищення  $\Delta t_p$  її температури;  $S_z, S_{\partial.z}$  – площі поперечного перерізу гідроциліндрів 10 і 14, значення яких попередньо приймаються як у базового ІВПМ, а у подальшому можуть уточнюватись;  $W_{n.d}$  – об'єм поршневої порожнини гідроциліндра 14;  $l_3, f_3, l_4, f_4$  – довжини та площі прохідного перерізу гідроліній допоміжного гідропривода базового ІВПМ.

Жорсткість  $c_y$  розраховується з умови забезпечення розвантаження порції відходів від дії осевого пресового зусилля на етапі повернення вібростолу 9 вниз. Це сприяє рівномірному перерозподіленню твердих частинок порції по об'єму прес-форми, а отже й кращому видаленню з відходів рідини. При цьому використовуємо формулу

$$c_y \leq P_{cm} (0,75 \cdot m_I - 0,25 \cdot m_{II36}) / m_{II36} z_{0y}. \quad (18)$$

Діаметр  $d_z$  визначаємо за допомогою залежності

$$d_z = 2 \sqrt{\frac{\Delta p_{m.max} \cdot S_m + c_y (z_{0y} + z_{In}) + \alpha_z v_{In} + \frac{m_I v_{In} - m_{II36} v_{II36}}{t_{il}}}{-(\lambda_{\partial.36} + \zeta_{\partial.36}) v_{II36}^2 - \alpha_{\partial.z} \cdot v_{II36} - c_{\partial.36} \cdot z_{II36} - R_{\partial.z} - 2 \cdot P_{cm}}} / \pi \cdot p_{z.max}, \quad (19)$$

де  $S_m$  – площа поперечного перерізу порції відходів;  $z_{In}, z_{II36}, v_{In}, v_{II36}$  – переміщення та швидкості виконавчих елементів вібропреса у момент часу  $t = t_n + t_{il}$  (див. рівняння (2));  $\lambda_{\partial.36}, \zeta_{\partial.36}, c_{\partial.36}$  – зведені коефіцієнти гідравлічного тертя, місцевих опорів та жорсткості підсистеми привода допоміжного гідроциліндра.

Потужність електродвигуна ГП обчислюється як

$$N_{el} = Q_{n1max} p_1 \frac{1 - p_2 / p_1}{\eta_n \eta_e \eta_m}, \quad (20)$$

де  $\eta_n, \eta_e, \eta_m$  – ККД насоса, електродвигуна і муфти, відповідно.

Під час розрахунку параметрів гідроімпульсної установки для потокового віброударного фільтрування на базі ІВПМ (див. рис. 12) як вихідні дані використовуються: параметри навантаження  $p_{m.max}, v, z_{Ia}$ ; максимальний  $p_{z1}$  та мінімальний  $p_{z2}$  тиски у ПНТ ГП; параметри робочої рідини ГП:  $\rho_{p.p}, K_{p.p}, W_p, W_z, h_{\phi}, \Delta t_p$ ; параметри фільтрованих відходів:  $\rho_m, c_{mz}, c_{pz}, \alpha_{mz}, \alpha_{pz}, \sigma_m$  (див. вище).

В процесі розрахунку визначають параметри фільтрувальної мембрани 3 (див. рис. 12); діаметри плунжера гідроциліндра 13 ГП –  $d_z$  та поршня допоміжного гідроциліндра 11 –  $d_{\partial.z}$ ; жорсткість  $c_y$  пружин 9 вібростолу 14; подачі насосів 4 і 8 –  $Q_{n1}$  і  $Q_{n2}$ ; потужності електродвигунів насосів –  $N_{e1}, N_{e2}$ . Велика частина розрахунку має перевірений характер.

Мембрану (мембрани) для установки, а також корпус 1 для їх розміщення доцільно вибрати готовими, залежно від заданого ступеню фільтрування

відходів та з врахуванням вимог до максимально допустимих габаритів установки і її продуктивності. Ряд західних фірм випускає подібні мембрани, для яких відомі такі параметри, як  $l_{\phi}$ ,  $d_{\phi}$ ,  $n_{\kappa}$ ,  $f_{\phi}$ ,  $S_{\phi}$ ,  $p_{m,n}$ ,  $v_{m0}$  і в тому числі  $n_{\phi,\phi}$  – кількість мембран у корпусі (у промислових установках, при значних обсягах відходів, що фільтруються паралельно установлюються десятки мембран).

З врахуванням цих даних здійснюється уточнення значення  $p_{m,max}$ , крім цього визначається середня швидкість  $v_I$  переміщення виконавчого елемента установки на I-му етапі циклу спрацьовування ГПІ за формулою

$$v_I = 2 \cdot z_{Ia} v. \quad (21)$$

Далі перевіряється дотримання умови  $v_I \geq 0,12 \cdot v_{m0}$ , при невиконанні якої  $v_I$  збільшується до величини  $v_I = 0,12 \cdot v_{m0}$ . В останньому випадку, з врахуванням зміненої  $v_I$ , за формулою (21) додатково здійснюють корекцію  $z_{Ia}$  або  $v$ .

Після цього за формулами (8) розраховуються  $\Delta p_{\phi I(II,III)}$ ,  $v_{\phi I(II,III)}$ , а також витрати  $Q_{\phi,одI(II,III)}$  фільтрату при використанні однієї вибраної мембрани. При цьому значення  $m$ ,  $q$ ,  $k_o$ ,  $r_{\kappa,o}$ ,  $R_{\phi}$  для підстановки у формули (8) установлюються експериментально за допомогою дослідного зразка проекрованої установки, під час фільтрування на ній конкретного виду відходів.

Обчислюють середню продуктивність  $Q_{\phi,од}$  фільтрування у продовж циклу ГПІ при використанні однієї мембрани

$$Q_{\phi,од} = (2 \cdot Q_{\phi,одI} + Q_{\phi,одII} + Q_{\phi,одIII}) / 4. \quad (22)$$

Потрібну для забезпечення заданої продуктивності  $Q_{\phi}$  фільтрування на даному конкретному підприємстві кількість  $n_{\phi,p}$  фільтрувальних мембран проекрованої установки обчислюємо як

$$n_{\phi,p} = Q_{\phi} / Q_{\phi,од}. \quad (23)$$

Отримане значення  $n_{\phi,p}$  округлюється до найближчого більшого цілого фактичного значення –  $n_{\phi,\phi}$ , а далі, виходячи з останнього, за таблицями технічного керівництва для вибраних мембран, визначається внутрішній діаметр  $D_{\phi,\kappa}$  корпусу для їх установлення. Діаметр  $d_{d,z}$  приймається рівним  $D_{\phi,\kappa}$ .

Також розраховують: необхідні подачі насосів установки

$$Q_{n1} = 2 \cdot p_{z1} W_{ГПІ} v / K_{звГПІ}; \quad Q_{n2} = v_{m0} f_{\phi} n_{\phi,\phi}; \quad (24)$$

діаметр плунжера гідроциліндра ГПІ

$$d_z = \sqrt{4 \cdot Q_{n1} / \pi \cdot v_I}; \quad (25)$$

та потужності електродвигунів установки

$$N_{e1} = Q_{n1} p_{z1} (1 - p_{z2} / p_{z1}) / \eta_{n1} \eta_{e1} \eta_{m1}; \quad N_{e2} = Q_{n2} p_{m,n} / \eta_{n2} \eta_{e2} \eta_{m2}, \quad (26)$$

де  $\eta_{n1}, \eta_{e1}, \eta_{m1}, \eta_{n2}, \eta_{e2}, \eta_{m2}$  - ККД насосів, електродвигунів та муфт між насосами та електродвигунами установки.

На рис. 17 представлена перспективна схема гідроімпульсної вальцевої установки для остаточного потокового віброударного зневоднення харчових відходів. Попередньо зневоднений до вологості 70 – 75% концентрат відходів скочується по лотку 30 у бункер 1, з якого регульованим потоком вивантажується на поверхню металеві фільтрувальної сітки 20, закріпленої на верхній поверхні матриці 28. Вивантаження відбувається в зоні Б, при цьому концентрат утворює на поверхні сітки рівномірний шар товщиною 5 – 15 мм.

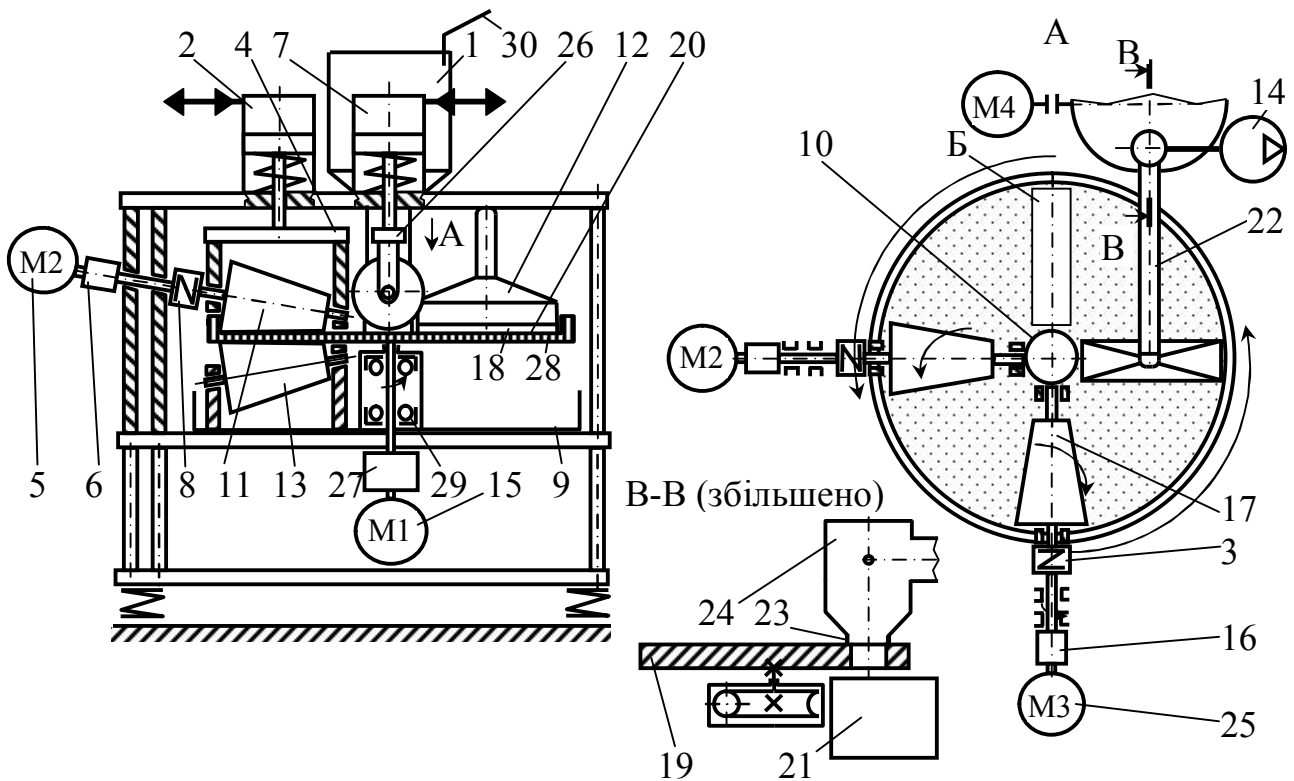


Рис. 17. Схема гідроімпульсної вальцьової установки для остаточного потокового віброударного зневоднення харчових відходів: 1 – бункер; 2, 7 – гідроциліндри ГП; 3, 8 – пружні муфти; 4, 26 – траверси; 5, 15, 25 – електродвигуни; 6, 16, 27 – планетарні редуктори; 9, 21 – баки; 10 – гумовий екран; 11, 13, 17 – конічні вальці; 12 – патрубок; 14 – вакуумний насос; 18 – гумовий ніж; 19 – диск; 20 – фільтрувальна сітка; 22 – труба; 23 – ущільнення; 24 – камера; 28 – матриця; 29 – підшипники; 30 – лоток.

Матриця 28 та концентрат на поверхні сітки 20 повільно обертаються – привод забезпечують електродвигун 15 та планетарний редуктор 27. Конічні вальці 11, 17, що приводяться від електродвигунів 5, 25 через планетарні редуктори 6, 16 та пружні муфти 8, 3, обертаються в напрямку протилежному напрямку обертання матриці, але з відповідною швидкістю для запобігання їх проковзуванню і прискореному зношуванню. Крім цього, вальці 11, 17 здійснюють вертикальні зворотно-поступальні переміщення з частотою до 150 Гц і амплітудою до 4 мм, що забезпечують гідроциліндри 2, 7 ГП, через траверси 4, 26. Концентрат, який потрапляє у зазор між вальцями 11, 17 та сіткою 20 піддається статичному стисканню і віброударному навантаженню. Видалена рідина стікає через сітку 20 і наскрізні отвори у матриці 28 (на схемі не показані) у бак 9. Тверді частинки концентрату затримуються сіткою 20. Вальці 13 підтримують матрицю 28 знизу, запобігаючи перекосу та заклинюванню підшипників 29. Після проходження під вальцем 17 зневоднений концентрат з  $U_k = 20 - 25\%$  зрізується гумовим ножем 18 і під впливом розрідження, створюваного вакуумним насосом 14, засмоктується у приєднані до нього патрубок 12 та трубу 22. По трубі 22 концентрат потрапляє у камеру 24 і накопичується у її нижній частині. Нижній відкритий кінець камери 24 ущільненням 23 підтискається до диску 19, що повільно обертається. В моменти, коли під камерою 24 проходить отвір диску 19, накопичений у ній концентрат порціями скидається у бак 21. Гумовий екран 10 слугує для

запобігання довільному переміщенню концентрату із зони Б одразу в зону його відведення з поверхні сітки 20.

На замовлення спільного підприємства «Галка Лтд», в рамках госпдоговірної НДР, на підставі схеми на рис. 17, розроблена конструкторська документація гідроімпульсної вальцьової установки для віброударного зневоднення кавового та ячмінного шламу, прийнята до впровадження на вказаному підприємстві.

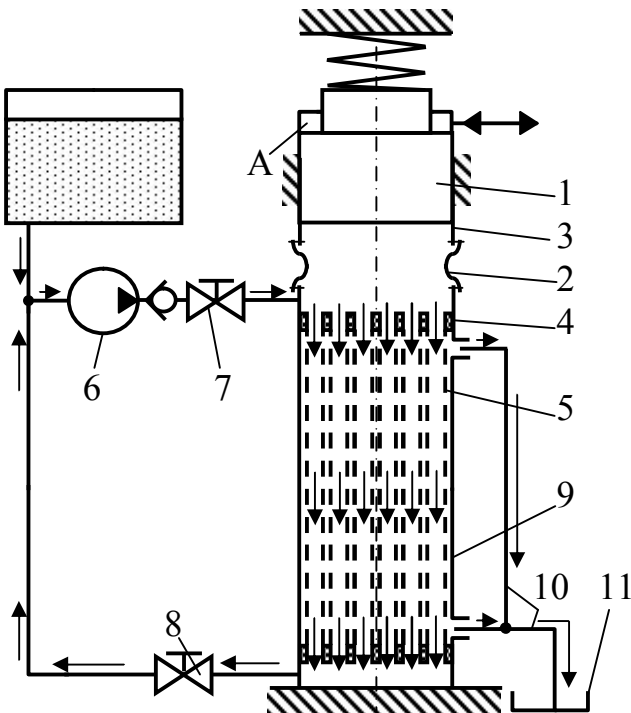


Рис. 18. Принципова гідро-кінематична схема гідроімпульсної установки для потокового віброударного фільтрування харчових відходів: 1 – плунжер; 2 – гумовотканинний рукав; 3, 9 – корпуси; 4 – ущільнювальне кільце; 5 – фільтрувальна мембрана; 6 – насос; 7, 8 – крани; 10 – відводи; 11 – бак.

На рис. 18 показана схема промислової гідроімпульсної установки для потокового віброударного фільтрування харчових відходів, у корпусі 9 якої встановлено кілька фільтрувальних мембран 5, що ущільнюються кільцями 4. Рідинна фаза відходів з дрібнодисперсними твердими частинками подається насосом 6 в напрямку, показаному стрілками. За допомогою кранів 7, 8 у середовищі відходів створюються початковий опір і тиск. При періодичній зміні у порожнині А, що зв'язана з нагнітальною гідролінією ГП, тиску робочої рідини, плунжер 1 здійснює вертикальні зворотно-поступальні переміщення, створюючи у середовищі відходів ударні хвилі напружень та деформацій. Фільтрат по відводах 10 стікає у бак 11. Гумовотканинний рукав 2 запобігає передачі вібрацій від корпусу 3 до мембран 5.

## ВИСНОВКИ

1. Розроблені класифікації та виконаний аналіз відомих способів та обладнання для зневоднення та фільтрування вологих дисперсних матеріалів. При цьому встановлено, що відомі механічні способи зневоднення не забезпечують необхідної вологості матеріалу (20 – 25%), термічні та електролітичні способи – дуже енергоємні (740 – 2500 кВт·год/т), а хімічні та біологічні – малопродуктивні (тривалість очищення порції матеріалу – 10 – 40 год), крім цього, для здійснення останніх необхідне громізде і дороге обладнання.

2. За допомогою гідроімпульсних стендів, створених на базі вібропресів ІВПМ, експериментально доведена висока ефективність пропонуваного способу віброударного фазового розділення. Зокрема, при віброударному зневодненні

кавового шламу, бурякового жому та спиртової барди, забезпечується істотно нижча кінцева вологість  $U_k$  концентрату – 20 – 24% проти 30...77% - після зневоднення на шнекових пресах і декантерних центрифугах. Віброударне фільтрування даних відходів, у порівнянні із безударним фільтруванням, забезпечує на 20 – 30% вищу і стабільнішу в часі продуктивність процесу.

3. На підставі положень і залежностей механіки, гідравліки, реології, резонансно-структурної теорії віброударного пресування сухих порошків проведений аналіз закономірностей протікання процесів віброударного фазового розділення харчових відходів. Для спрощення даного аналізу він здійснювався окремо для кожного етапу циклу спрацьовування привода гідроімпульсного обладнання для розділення, кожної фази і кожної ділянки порції відходів.

4. Розроблені безінерційні реологічні моделі вологого дисперсного матеріалу під час реалізації досліджуваних процесів віброударного фазового розділення. На даних моделях враховані пружність і в'язкість рідинної і твердої фаз матеріалу, їх взаємодія, пластичність твердих частинок, а також наявність у матеріалі вільної рідини. На підставі моделей складені системи реологічних рівнянь, що дозволяють визначати зміни дотичних і стискаючих напружень, а також деформацій оброблюваного матеріалу.

5. За результатами розрахунків встановлено, що висока ефективність віброударного зневоднення харчових відходів (спиртової барди та пивної дробини) у порівнянні із їх статичним пресуванням обумовлена у 3 - 4 рази вищою швидкістю передачі енергії від виконавчих елементів вібропреса частинкам відходів, тоді як загальна величина цієї енергії є у 40 - 50 разів меншою. Під час реалізації пропонованого способу забезпечується 10 – 20-разове збільшення прискорень твердих частинок відходів, їх проходження через стан резонансу наприкінці кожного циклу навантаження, що призводить до підвищення рухомості та інтенсифікації руйнування зв'язків між частинками.

6. Експериментально доведено, що в результаті проходження у середовищі відходів (кавового шламу, спиртової барди та бурякового жому) в процесі їх віброударного зневоднення хвиль дотичних та стискаючих, прямих і зворотних деформацій та напружень, забезпечується періодичне перерозподілення твердих частинок по об'єму прес-форми з їх поворотами, зсувами, прослизаннями та більш щільним укладанням, що сприяє кращому (на 10 – 55%), ніж при статичному пресуванні видаленню рідини.

7. Експериментами і розрахунками встановлено, що висока ефективність віброударного фільтрування обумовлена створенням під час його реалізації у середовищі відходів, що циркулюють по каналах фільтрувальної мембрани, хвиль напружень і деформацій. Таким чином, забезпечуються періодичні підвищення тиску у середовищі відходів (у 3 – 4 рази під час фільтрування спиртової барди), збільшення швидкості їх руху (на 10 – 12%), зменшення сил тертя між твердими частинками відходів, руйнування склепін з частинок на внутрішній поверхні мембрани, зменшення товщини шару осаду на ній та забивання пор мембрани, вища (на 20%) та стабільніша в часі продуктивність процесу.

8. Розроблені динамічні та математичні моделі досліджуваних процесів і обладнання, що дозволяють отримувати залежності між робочими параметрами процесів, параметрами ефективності останніх, конструктивними параметрами обладнання, параметрами навантаження відходів та їх фізико-механічними характеристиками. Коректність моделей перевірена експериментально, за допомогою гідроімпульсних стендів, шляхом зіставлення відповідних розрахункових та експериментальних залежностей для процесів зневоднення і фільтрування кавового шламу, бурякового жому та спиртової барди. При цьому число експериментальних вимірювань-записів на кожному досліджуваному режимі складало не менше 9, максимальна результуюча середня квадратична похибка вимірювань була не більшою 5,2%, а максимальна відносна величина розбіжностей не перевищувала 11,3%, що доводить адекватність розроблених моделей реальним процесам та обладнанню.

9. На підставі математичних моделей досліджуваних процесів і обладнання розроблені методики проектного розрахунку, що дозволяють визначати оптимальні конструктивні параметри обладнання, виходячи із заданих фізико-механічних характеристик вологих дисперсних відходів та параметрів їх навантаження.

10. Розроблена загальна послідовність реалізації досліджуваних процесів, які пропонується ділити на декілька стадій, з використанням на кожній з них окремої одиниці обладнання та збільшенням від стадії до стадії питомого зусилля навантаження відходів, що забезпечує найвищу ефективність процесів в цілому. Запропоновані перспективні схеми та вимоги до схем обладнання для здійснення вказаної послідовності, а також рекомендації з впровадження обладнання на виробництві.

11. Розроблена конструкторська документація гідроімпульсної установки для потокового віброударного зневоднення вологих дисперсних відходів, прийнята до впровадження на підприємствах харчової промисловості: Львівському СП «Галка Лтд», Львівському науково-виробничому підприємстві «Термінал», Обухівському ТОВ «ЮГОВ». Розрахований економічний ефект (13 599,58 тис. грн/рік) від впровадження на СП «Галка Лтд» технологічного комплексу для віброударного фазового розділення кавового та ячмінного шламу, а також котлів для спалювання його концентрату. Термін окупності комплексу та котлів – 4 міс, крім цього, при їх застосуванні значно зменшується негативний вплив на навколишнє середовище.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ОСОБИСТИЙ ВНЕСОК В НИХ АВТОРА**

1. Іскович-Лотоцький Р. Д. Процеси та машини вібраційних і віброударних технологій. Монографія/ Іскович-Лотоцький Р. Д., Обертюх Р. Р., Севостьянов І. В. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2006. – 291 с (*Особистий внесок: Вібропресове обладнання з гідроімпульсним приводом для багатокомпонентного віброударного навантаження; Вібропреси для багатокомпонентного віброударного навантаження на основі базових моделей*

*ІВПМ; Використання вібропресового обладнання з ГПП для зневоднення відходів харчових виробництв; здійснено загальне редагування рукопису монографії).*

2. Севостьянов И. В. Процессы и оборудование для виброударного разделения пищевых отходов. Монография/ И. В. Севостьянов. – Saarbrücken (Німеччина): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 417 с.

3. Искович-Лотоцкий Р. Д. Математическая модель гидроимпульсного привода вибропресса для многокомпонентного нагружения/ Р. Д. Искович-Лотоцкий, И. В. Севостьянов // Вестник Национального технического университета Украины “Киевский политехнический институт”. Машиностроение, 1999. – Вып. 36. – Т.1. – С. 50 – 57 (*Особистий внесок: динамічні та математичні моделі вібропреса*).

4. Искович-Лотоцкий Р. Д. Инерционный вибропресс-молот с возвратно-винтовым движением вібростола/ Искович-Лотоцкий Р. Д., Севостьянов И. В., Обертюх Р. Р., Полищук Л. К. // Периодический сборник научных трудов. Обработка дисперсных материалов и сред. Теория, исследования, технология, оборудование. – Вып. 10. – Одесса: НПО «ВОТУМ», 2000. – С. 55 – 57 (*Особистий внесок: конструкція приводу зворотно-гвинтових рухів вібростолу*).

5. Искович-Лотоцкий Р. Д. Перспективы развития вибропресового оборудования з гідроімпульсним приводом для багатоконпонентного складнопросторового навантаження/ Р. Д. Искович-Лотоцкий, И. В. Севостьянов // Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение, 2002. – Вып. 42. – Том 1. - С. 169 – 174 (*Особистий внесок: схеми вібропресів для багатоконпонентного складно-просторового навантаження*).

6. Искович-Лотоцкий Р. Д. Вібропресова машина для обезводнювання відходів харчових виробництв/ Искович-Лотоцкий Р. Д., Севостьянов И. В., Андрущук В. Д. // Вибрации в технике и технологиях, 2002. – №3 (24). – С. 48 – 50 (*Особистий внесок: схема машини, опис її конструкції та робочого циклу*).

7. Искович-Лотоцкий Р. Д. Методика проектного розрахунку параметрів гідроімпульсного привода вібропреса/ Р. Д. Искович-Лотоцкий, И. В. Севостьянов // Вибрации в технике и технологиях, 2003. – №5 (31). – С. 31-34 (*Особистий внесок: залежності для визначення конструктивних параметрів вібропреса*).

8. Искович-Лотоцкий Р. Д. Гідрофіковані прес-форми для багатоконпонентного виброударного інерційного навантаження дисперсних мас/ Р. Д. Искович-Лотоцкий, И. В. Севост'янов // Наукові нотатки. Межвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»), 2004. – Випуск 14 (травень). – С. 107 – 116 (*Особистий внесок: конструкції прес-форм*).

9. Искович-Лотоцкий Р. Д. Розрахунок параметрів вибропресового обладнання з гідроімпульсним приводом для зневоднення вторинних продуктів переробних та харчових виробництв/ Р. Д. Искович-Лотоцкий, И. В. Севостьянов // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2007. – №3. – Ч. 1. – С. 105 – 108 (*Особистий внесок: розрахункові формули та розрахунок*).

10. Севостьянов І. В. Особливості віброударного зневоднення продуктів переробних виробництв/ Севостьянов І. В., Іскович-Лотоцький Р. Д., Поліщук О. В. // Наукові нотатки. Межвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»), 2007. – Випуск 20. – С. 443 – 446 (*Особистий внесок: закономірності ефективності процесів віброударного зневоднення продуктів переробних виробництв*).

11. Іскович-Лотоцький Р. Д. Вібраційні та віброударні технології в процесах сепарування вологих дисперсних матеріалів/ Р. Д. Іскович-Лотоцький, І. В. Севостьянов // Вібрації в техніці та технологіях, 2007. – №4. – С. 18 – 21 (*Особистий внесок: зіставлення ефективності вібраційного та віброударного сепарування*).

12. Севостьянов І. В. Математичне моделювання процесів віброударного сепарування вологих дисперсних матеріалів/ І. В. Севостьянов, Р. Д. Іскович-Лотоцький // Вібрації в техніці та технологіях, 2008. – №2. – С. 39 – 45 (*Особистий внесок: динамічні моделі твердої і рідинної частинок матеріалу, математичні моделі процесів*).

13. Іскович-Лотоцький Р. Д. Обґрунтування ефективності застосування віброударних та вібраційних процесів в харчовій переробній промисловості/ Іскович-Лотоцький Р. Д., Поліщук О. В., Севостьянов І. В. // Вібрації в техніці та технологіях, 2008. – №3. – С. 78 – 82 (*Особистий внесок: аналіз одержаних експериментальних даних*).

14. Севостьянов І. В. Підвищення ефективності роботи машин для розмелювання дисперсних матеріалів/ І. В. Севостьянов, Р. Д. Іскович-Лотоцький// Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2008. – №3. – С. 88 – 93 (*Особистий внесок: технологічна схема та розрахунки для обґрунтування її ефективності*).

15. Севостьянов І. В. Визначення робочих параметрів процесів віброударного сепарування вологих дисперсних матеріалів/ І. В. Севостьянов, Р. Д. Іскович-Лотоцький // Наукові нотатки. Межвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»), 2008. – Випуск 23. – С. 282 – 292 (*Особистий внесок: рівняння для визначення робочих параметрів процесів та параметрів їх ефективності*).

16. Севостьянов І. В. Теоретичні основи процесів фільтрування вологих дисперсних матеріалів під впливом ударних хвиль напруг та деформацій / Севостьянов І. В., Іскович-Лотоцький Р. Д., Обертюх Р. Р. // Промислова гідравліка та пневматика. – №2, 2008. – С. 40 – 43 (*Особистий внесок: залежності для визначення робочих параметрів процесів, доведення їх високої ефективності*).

17. 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 (*Особистий внесок: класифікація способів і обладнання для сепарування, їх аналіз, схема комплексу для сепарування*).

18. Севостьянов І. В. Експериментальні дослідження процесів потокового віброударного фільтрування вологих дисперсних матеріалів/ Севостьянов І. В., Іскович-Лотоцький Р. Д., Любин В.С. // Промислова гідравліка та пневматика, 2010. – №4. – С. 89 – 92 (*Особистий внесок: залежності параметрів ефективності досліджуваних процесів, аналіз отриманих результатів*).

19. Севостьянов І. В. Моделювання процесів потокового віброударного фільтрування вологих дисперсних матеріалів/ Севостьянов І. В., Іскович-Лотоцький Р. Д., Любин В.С. // Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету. Серія: Технічні науки, 2010. – Випуск 4. – С. 13 – 23 (*Особистий внесок: динамічні та математичні моделі процесів*).

20. Севостьянов І. В. Методика проектного розрахунку гідроімпульсного вібропреса для попереднього потокового віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів/ Севостьянов І. В., Іскович-Лотоцький Р. Д., Любин В. С. // Український міжвідомчий науково-технічний збірник «Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні і приладобудуванні», 2011. – Вип. 45. – С. 346 – 353 (*Особистий внесок: рівняння для визначення робочих параметрів вібропреса*).

21. Севостьянов І. В. Моделювання гідроімпульсної установки для потокового віброударного очищення вологих дисперсних матеріалів/ Севостьянов І. В., Іскович-Лотоцький Р. Д., Любин В. С.// Промислова гідравліка і пневматика, 2012. – №2 (36). – С. 10 – 15 (*Особистий внесок: модель установки, формули для визначення параметрів навантаження*).

22. Севостьянов І. В. Теоретичні дослідження гідроімпульсного вібропреса для потокового віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів/ Севостьянов І. В.// Вісник національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Машинобудування, 2012. – Випуск №64. – С. 119 – 126.

23. Севостьянов І. В. Перспективні схеми гідроімпульсних машин для потокового віброударного фазового розділення вологих дисперсних матеріалів/ Севостьянов І. В.// Промислова гідравліка і пневматика, 2012. – №3 (37). – С. 7 – 11.

24. Севостьянов І. В. Реологічні моделі та рівняння вологих дисперсних матеріалів під час їх віброударного інерційного навантаження/ Севостьянов І. В., Іванчук Я. В.// Вісник національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Машинобудування, 2012. – Випуск №65. – С. 63 – 70. (*Особистий внесок: реологічні моделі та рівняння вологих дисперсних матеріалів*).

25. Іскович-Лотоцький Р. Д. Визначення робочих параметрів гідроімпульсного вібропреса для потокового віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів/ Іскович-Лотоцький Р. Д., Севостьянов І. В., Іванчук Я. В., Любин В. С.// Промислова гідравліка і пневматика, 2012. – №4 (38). – С. 57 – 60. (*Особистий внесок: залежності для визначення робочих параметрів вібропреса*).

26. Sevostyanov I. The analysis of methods and the equipment for clearing of the damp disperse waste of food productions / I. Sevostyanov // Tehnomus. New

technologies and products in machine manufacturing technologies (Румунія), 2013. – No. 20. – P. 44 – 49.

27. Севостьянов И. В. Регенерация отработанных масел с использованием виброударной инерционной нагрузки/ И. В. Севостьянов// Двойные технологии (Росія), 2013. - № 2. – С. 45 - 50.

28. Севостьянов И. В. Экономическая эффективность виброударного фазового разделения влажных дисперсных пищевых отходов / И. В. Севостьянов// Научная перспектива (Росія), 2013. - № 6(40). – С. 51 - 54.

29. Севостьянов И. В. Теоретические исследования процессов потокового виброударного фильтрования влажных дисперсных сред в пищевой промышленности/ И. В. Севостьянов, Я. В. Иванчук// MOTROL commission of motorization and energetics in agriculture. – Lublin (Польша), 2013. – Vol. 15/ - No. 4. – P. 90 – 96. *(Особистий внесок: рівняння та залежності для визначення робочих параметрів процесів).*

30. Севостьянов І. В. Динаміка коливальних процесів у середовищі вологих дисперсних матеріалів під час їх віброударного зневоднення/ І. В. Севостьянов // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2013. - №3. - С. 105 – 109.

31. Севостьянов И. В. Экспериментальные исследования процессов виброударного обезвоживания влажных дисперсных пищевых отходов/ И. В. Севостьянов // Восточно-европейский журнал передовых технологий, 2013. - №3/7(63). - С. 19 – 23.

32. Севостьянов І. В. Високоєфективні технологічні комплекси для зневоднення та фільтрування дисперсних харчових відходів/ І. В. Севостьянов // Технологический аудит и резервы производства, 2013. - №3/2(11). - С. 14 – 19.

33. Севостьянов И. В. Методика расчета параметров гидроимпульсной установки для потокового виброударного фильтрования дисперсных пищевых отходов/ И. В. Севостьянов// Вісник національного технічного університету «ХП», 2013. - №26. - С. 164 – 169.

34. Пат. 60694 U, Україна, МПК В21J 9/06: Вібраційна гідроімпульсна установка / Севостьянов І. В., Іскович-Лотоцький Р. Д., Любин С. В. (Україна). – №u201014687; Заявл. 07.12.2010; Опубл. 25.06.2011. Бюл. №12, 2011 р. *(Особистий внесок: підсистема очищення відходів).*

35. Пат. 68777 U, Україна, МПК В01D 39/10: Гідроімпульсне сито/ Севостьянов І. В., Іскович-Лотоцький Р. Д., Любин С. В. (Україна). – №u201111382; Заявл. 26.09.2011; Опубл. 10.04.2012. Бюл. №7, 2012 р. *(Особистий внесок: підсистеми безперервного обертання сита, його очищення та просушування).*

36. Пат. 68774 U, Україна, МПК А01F 15/00: Гідроімпульсна валкова машина / Севостьянов І. В., Іскович-Лотоцький Р. Д., Любин С. В. (Україна). – №u201111375; Заявл. 26.09.2011; Опубл. 10.04.2012. Бюл. №7, 2012 р. *(Особистий внесок: підсистема подачі та відведення матеріалу з робочої зони машини).*

37. Пат. 69638 U, Україна, МПК А01 F15/00: Гідроімпульсна вальцьова установка/Севостьянов І. В., Іскович-Лотоцький Р. Д., Любин С. В. (Україна). –

№u201111885; Заявл. 10.10.2011; Опубл. 10.05.2012. Бюл. №9, 2012 р. *(Особистий внесок: структура привода та загальна будова установки).*

38. Севостьянов І. В. Процеси та машини для потокового віброударного фазового розділення вологих дисперсних матеріалів/ Севостьянов І.В.// Матеріали II Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві». – Суми 17 – 20 квітня 2012 р. – Ч.2. - С. 29 – 30.

39. Севостьянов І. В. Перспективні схеми гідроімпульсних машин для потокового віброударного фазового розділення вологих дисперсних матеріалів/ Севостьянов І. В.// Матеріали XVII міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». – 17 – 20 квітня 2012 р. – м. Черкаси. – С. 139.

40. Іскович-Лотоцький Р. Д. Визначення робочих параметрів гідроімпульсного вібропреса для потокового віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів/ Іскович-Лотоцький Р. Д., Севостьянов І. В., Іванчук Я. В., Любин В. С.// Матеріали XVII міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». – 17 – 20 квітня 2012 р. – м. Черкаси. – С. 140 *(Особистий внесок: залежності для визначення робочих параметрів вібропреса).*

41. Севостьянов І. В. Реологічні моделі та рівняння вологих дисперсних матеріалів під час їх потокового віброударного фазового розділення/ Севостьянов І. В. // XIII Международная научно-техническая конференция «Прогрессивная техника и технология». Севастополь 11 – 15 июня 2012 г.: Материалы конференции. – Ч. 2. – Киев, 2012. – С. – 15 – 16.

42. Севостьянов І. В. Експериментальні дослідження процесів потокового віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів/ Севостьянов І. В. // XIII міжнародна науково-технічна конференція АС ППП «Промислова гідравліка і пневматика». Чернігів 19 – 20 вересня 2012 р. Матеріали конференції. – Вінниця: ГЛОБУС-ПРЕС, 2012. – С. 117.

43. Севостьянов І. В. Аналіз механізму та ефективності процесів потокового віброударного очищення вологих дисперсних матеріалів/ Севостьянов І. В., Іскович-Лотоцький Р. Д., Любин С. В. // XIII міжнародна науково-технічна конференція АС ППП «Промислова гідравліка і пневматика». Чернігів 19 – 20 вересня 2012 р. Матеріали конференції. – Вінниця: ГЛОБУС-ПРЕС. – С. 118. *(Особистий внесок: аналіз механізму та ефективності процесів потокового віброударного очищення).*

## АНОТАЦІЯ

**Севостьянов І.В. Теоретичні основи процесів та обладнання для віброударного зневоднення відходів харчових виробництв. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Національний університет харчових технологій Міністерства освіти і науки України, Київ, 2013.

Дисертація присвячена розв'язанню актуальних проблем утилізації відходів харчових виробництв, зменшення їх негативного впливу на довкілля та одержання цінного сільськогосподарського корму або висококалорійного палива, шляхом розробки теоретичних основ процесів та гідроімпульсного обладнання для віброударного фазового розділення вологих дисперсних харчових відходів, що забезпечує їх найбільш ефективне використання.

У дисертації визначені закономірності протікання та ефективності процесів віброударного зневоднення та фільтрування харчових відходів, розроблені безінерційні реологічні моделі та рівняння вологих дисперсних матеріалів, що дозволяють визначати напруження та деформації їх твердої та рідинної фаз.

Запропоновані математичні моделі процесів віброударного зневоднення та фільтрування, а також математичні моделі гідроімпульсного обладнання для їх реалізації, рівняння яких установлюють зв'язки між конструктивними параметрами обладнання, фізико-механічними характеристиками вологих дисперсних відходів, параметрами їх навантаження та параметрами ефективності процесів.

Розроблені методики проектного розрахунку та перспективні схеми гідроімпульсного обладнання для віброударного фазового розділення вологих дисперсних відходів. На підставі однієї з цих схем розроблена конструкторська документація установки для віброударного зневоднення, прийнята до впровадження кількома вітчизняними підприємствами харчової промисловості.

**Ключові слова:** віброударне фазове розділення, вологі дисперсні відходи, гідроімпульсне обладнання, зневоднення, фільтрування, реологічні моделі.

## АННОТАЦІЯ

Севостьянов И.В. Теоретические основы процессов и оборудования для виброударного обезвоживания отходов пищевых производств. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.18.12 – процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. – Национальный университет пищевых технологий Министерства образования и науки Украины, Киев, 2013.

Диссертация посвящена решению актуальных проблем утилизации отходов пищевых производств, уменьшения их негативного воздействия на окружающую среду и получения ценного сельскохозяйственного корма или высококалорийного топлива, путем разработки теоретических основ процессов и гидроимпульсного оборудования для виброударного фазового разделения влажных дисперсных пищевых отходов, что обеспечивает их наиболее эффективное использование.

В диссертации теоретически (на основании результатов расчетов) и экспериментально (с помощью созданных гидроимпульсных стендов) обоснована высокая эффективность предлагаемых способов виброударного

обезвоживания и фильтрования влажных дисперсных отходов по сравнению с другими известными способами фазового разделения, по энергоемкости, производительности и обеспечиваемой конечной влажности концентрата отходов.

Определены закономерности протекания и эффективности процессов виброударного обезвоживания и фильтрования пищевых отходов. Разработаны безинерционные реологические модели и уравнения влажных дисперсных материалов в процессе их виброударной инерционной нагрузки, в которых учитываются вязкость и сжимаемость твердой и жидкой фаз, взаимодействие между ними, пластичность твердых частиц, наличие в материале свободной жидкости. Предложенные уравнения позволяют определять касательные и сжимающие напряжения, а также деформации фаз материала.

С использованием динамических моделей и схем нагрузки частиц твердой и жидкой фаз влажных дисперсных отходов в процессах их виброударного обезвоживания и фильтрования, а также динамических моделей гидроимпульсного оборудования для их осуществления, разработаны математические модели исследуемых процессов и оборудования. Уравнения моделей устанавливают связи между конструктивными параметрами оборудования, физико-механическими характеристиками отходов, параметрами их нагрузки и параметрами эффективности процессов.

Предложены методики проектного расчета гидроимпульсного оборудования для виброударного фазового разделения, позволяющие определять оптимальные конструктивные параметры оборудования, исходя из заданных физико-механических характеристик влажных дисперсных отходов и параметров их нагрузки, при условии обеспечения минимальной энергоемкости и максимальной производительности рабочих процессов. Разработаны рациональная технологическая последовательность виброударного фазового разделения влажных дисперсных отходов, перспективные схемы гидроимпульсного оборудования для реализации данной последовательности, а также рекомендации по практическому внедрению схем на производстве. На основании одной из данных схем разработана конструкторская документация установки для виброударного обезвоживания влажных дисперсных отходов, принятая к внедрению несколькими отечественными предприятиями пищевой промышленности. Определен экономический эффект от внедрения предлагаемого оборудования на одном из пищевых предприятий и сроки его окупаемости.

**Ключевые слова:** виброударное фазовое разделение, влажные дисперсные отходы, гидроимпульсное оборудование, обезвоживание, фильтрование, реологические модели.

## SUMMARY

**Sevostyanov Ivan. The theoretical bases of the processes and equipment for vibro-blowing dehydration of waists of food productions. - On rights of manuscript.**

The thesis on pursuing of scientific degree of doctor of the technical sciences in specialty 05.18.12 - processes and equipment of food, microbiological and pharmaceutical productions. - National university of food technologies of Ministry of the education and sciences of Ukraine, Kiev, 2013.

This thesis is dedicated to solving of actual problems of salvaging of waists of food production, reduction their negative influence on nature and obtaining of valuable agricultural stern or high-energy fuel, by development of theoretical bases of processes and hydraulic pulse equipment for vibro-blowing phase division of humid dispersive food waists, that provides its most efficient use.

Regularities of progression and efficiency of the processes of vibro-blowing dehydration and filtration of food waists is determined, uninertia rheological models and equations of humid dispersive materials, is designed, that allow to define the tensions and deformations of material's phases.

Mathematical models of processes of the vibro-blowing dehydration and filtration, as well as mathematical models of hydraulic pulse equipment for its realization is offered in this thesis. Equations of models install the connections between constructive parameters of the equipment, physico-mechanical features of the waists, parameters of its loading and parameters of efficiency of the processes.

The methods of the design calculation and perspective schemes of hydraulic pulse equipment for vibro-blowing phase division of humid dispersive waists is developed. Design documentation of the installation for vibro-blowing dehydration, that developed on the grounds of one of this schemes, is received to introduction by several domestic enterprises of food industry.

**The keywords:** vibro-blowing phase division, humid dispersive waists, hydraulic pulse equipment, dehydration, filtration, rheological models.