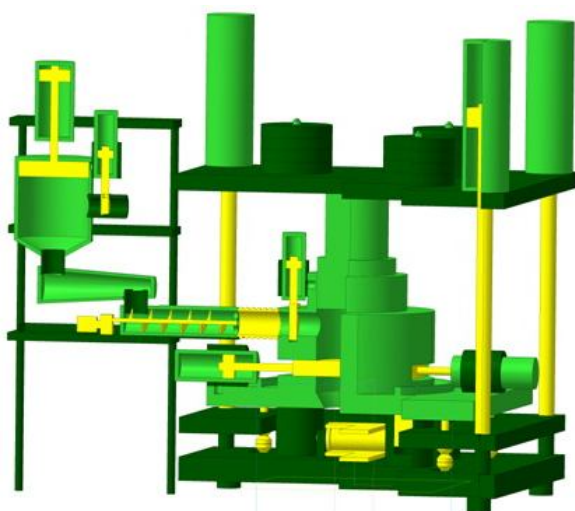




І. В. Севостьянов

ТЕХНОЛОГІЯ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВІБРОУДАРНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ ВОЛОГИХ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ



**Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний аграрний університет**

І. В. Севостьянов

**ТЕХНОЛОГІЯ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ
ВІБРОУДАРНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ
ВОЛОГИХ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Монографія

**ВНАУ
2020**

УДК 621.979.3:66.066:66.068

С-28

*Рекомендовано Вченою радою Вінницького національного аграрного університету Міністерства освіти і науки України як монографія
(Протокол №10 від 31.03.2020 р.)*

Рецензенти:

В. М. Булгаков – академік НААН України, доктор технічних наук, професор кафедри механіки Національного університету біоресурсів та природокористування,

В. Л. Зав'ялов – доктор технічних наук, професор кафедри процесів та апаратів харчових виробництв Національного університету харчових технологій,

О. В. Солона – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри загально технічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету.

Севостьянов І. В.

С-28 Технологія та обладнання для віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів: монографія / І. В. Севостьянов. – Вінниця : ВНАУ, 2020. – 303 с.

У монографії розглядаються теоретичні основи процесів та обладнання для потокового віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів, які є вторинним продуктом харчових та переробних виробництв та можуть після зневоднення використовуватись як цінні добавки для сільськогосподарських кормів або в якості палива. У роботі наводяться технологічні та конструктивні схеми, динамічні і математичні моделі процесів та обладнання для віброударного зневоднення, пропонуються методика проектного розрахунку та перспективні схеми промислових установок. Теоретичні дослідження та розрахунки підтверджуються експериментами на дослідному обладнанні.

Для науковців, фахівців з вібротехнологій, викладачів, аспірантів, студентів.

ISBN 978-617-7789-16-0

УДК 621.979.3:66.066:66.068

С-28

ISBN 978-617-7789-16-0

© І.В. Севостьянов, 2020

© ВНАУ, 2020

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ОГЛЯД РОЗРОБОК ТА ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗНЕВОДНЕННЯ ВОЛОГИХ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	8
1.1 Аналіз способів зневоднення вологих дисперсних матеріалів та обладнання для їх реалізації.....	8
1.2 Дослідження процесів зневоднення вологих дисперсних матеріалів.....	26
1.2.1 Реологія вологих дисперсних матеріалів.....	26
1.2.2 Статичне пресування вологих дисперсних матеріалів.....	29
1.2.3 Вібраційне навантаження вологих дисперсних матеріалів.....	32
1.3 Резонансно-структурна теорія процесів віброударного інерційного пресування сухих непластичних порошків.....	35
2 ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОПОНОВАНОГО СПОСОБУ ВІБРОУДАРНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ ВОЛОГИХ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЙОГО ЗДІЙСНЕННЯ.....	40
2.1 Створення експериментального гідроімпульсного стенду для віброударного зневоднення.....	40
2.2 Визначення параметрів ефективності процесів віброударного зневоднення.....	46
2.2.1 Розробка програми експериментів.....	46
2.2.2 Визначення параметрів навантаження та регулювання.....	47
2.2.3 Вибір контрольно-вимірювальної апаратури.....	47
2.2.4 Визначення параметрів ефективності процесів віброударного зневоднення.....	48
2.3 Порівняння ефективності пропонованого способу з ефективністю інших способів зневоднення.....	53
3 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ТА КОНСТРУКТИВНИХ СХЕМ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВІБРОУДАРНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ ВОЛОГИХ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	55
3.1 Розробка послідовності реалізації технологічних процесів віброударного фазового розділення.....	55
3.2 Розробка конструктивних схем гідроімпульсного обладнання для віброударного зневоднення.....	56
3.3 Розробка вимог до процесів і обладнання для віброударного зневоднення.....	61
4 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ ВІБРОУДАРНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ ВОЛОГИХ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	63
4.1 Аналіз закономірностей протікання та ефективності процесів віброударного зневоднення.....	63

4.2	Моделювання процесів віброударного зневоднення	80
4.3	Установлення залежностей параметрів ефективності від робочих процесів віброударного зневоднення.....	95
5	ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ГІДРОІМПУЛЬСНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗНЕВОДНЕННЯ ВОЛОГИХ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	111
5.1	Розробка структурної схеми гідроімпульсного вібропреса для віброударного зневоднення.....	111
5.2	Динамічне моделювання гідроімпульсного вібропреса для віброударного зневоднення.....	114
5.3	Математичне моделювання гідроімпульсного вібропреса для віброударного зневоднення.....	118
5.4	Розрахунок і аналіз залежностей параметрів навантаження під час віброударного зневоднення від конструктивних параметрів гідроімпульсного вібропреса.....	132
6	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТА ГІДРОІМПУЛЬСНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВІБРОУДАРНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ ВОЛОГИХ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	137
6.1	Створення експериментального гідроімпульсного стенду для віброударного зневоднення.....	137
6.2	Розробка програми експериментів.....	139
6.3	Вибір контрольно-вимірювальної апаратури.....	139
6.4	Експериментальне обґрунтування коректності математичних моделей процесів віброударного зневоднення.....	141
6.5	Одержання експериментальних залежностей параметрів навантаження під час віброударного зневоднення та зіставлення їх з відповідними розрахунковими залежностями.....	146
7	РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТНОГО РОЗРАХУНКУ ТА ПЕРСПЕКТИВНИХ СХЕМ ГІДРОІМПУЛЬСНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВІБРОУДАРНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ ВОЛОГИХ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	150
7.1	Розробка методики проектного розрахунку гідроімпульсних вібропресів для віброударного зневоднення.....	150
7.2	Розробка перспективних схем гідроімпульсного обладнання для віброударного зневоднення.....	158
7.3	Рекомендації з практичного впровадження обладнання.....	166
8	РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗНЕВОДНЕННЯ ВОЛОГИХ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	169
	ВИСНОВКИ.....	244
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	246
	ДОДАТКИ.....	265

ВСТУП

Останнім часом однією з основних проблем вітчизняних підприємств харчової промисловості є утилізація матеріалів – 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 матеріалів 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 матеріалів, захисту довкілля та одержання висококалорійного корму або палива.

Для розв'язання вказаних проблем нами пропонується спосіб віброударного зневоднення 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, пропонований спосіб і обладнання забезпечують високу продуктивність процесу, при нижчих енергоємності, складності, вартості та матеріалоємності обладнання, за умови дотримання заданої кінцевої вологості концентрату матеріалів. Але для одержання високих показників ефективності віброударного зневоднення необхідно вибрати і забезпечити оптимальні конструктивні параметри гідроімпульсного обладнання для його реалізації та відповідні параметри навантаження матеріалів, 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. 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 зневоднення вологих дисперсних матеріалів, оскільки не

враховують деякі їх важливі властивості: різницю у фізико-механічних характеристиках фаз, взаємодію між ними, наявність у матеріалах 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 вологих дисперсних матеріалів, а також розробки гідроімпульсного обладнання для їх реалізації є достатньо актуальними.

Метою даної 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 зневоднення, що забезпечує найбільш ефективне розв'язання вказаних проблем.

Для досягнення вказаної мети необхідно виконати такі основні завдання:

- здійснити аналіз способів та обладнання для зневоднення вологих дисперсних матеріалів; теоретично та експериментально обґрунтувати високу ефективність пропонованого способу віброударного зневоднення на гідроімпульсному обладнанні, яке переважає інші види обладнання за продуктивністю, енергоємністю та кінцевою вологістю концентрату матеріалів, що забезпечується;

- розробити схеми високоефективних технологічних процесів та гідроімпульсного обладнання для віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів;

- розробити схеми навантаження матеріалів під час їх віброударного зневоднення, а також динамічні моделі матеріалів, 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;

- 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 матеріалів;

- розробити математичні моделі досліджуваного гідроімпульсного обладнання для віброударного зневоднення, рівняння яких зв'язують

параметри навантаження вологих дисперсних матеріалів, 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 зневоднення вологих дисперсних матеріалів, 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.

Нижче подані основні результати розв'язання даних задач.

1 ОГЛЯД РОЗРОБОК ТА ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗНЕВОДНЕННЯ ВОЛОГИХ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Аналіз способів зневоднення вологих дисперсних матеріалів та обладнання для їх реалізації

Сучасні підприємства харчової та переробної промисловості відрізняються значними обсягами виробництва, а більшість технологічних процесів на них цілком автоматизовані і здійснюються у безперервному режимі у продовж 2-3-х змін на добу [1, 2, 3]. У зв'язку із цим, основними вимогами до способів і обладнання для зневоднення матеріалів даних виробництв є [4, 5]:

- забезпечення достатньо високої продуктивності робочого процесу;
- дотримання заданих достатньо низької кінцевої вологості концентрату оброблюваного матеріалу [6, 7];
- здійснення процесів у безперервному цілком автоматизованому режимі, із залишенням людині-оператору лише функцій контролю та керування [8, 9, 10];
- порівняно невеликі енергоємність, конструктивна складність, габарити та матеріалоемність обладнання [2, 11];
- висока надійність обладнання, наявність в ньому пристроїв для захисту від аварій при перевантаженнях, забезпечення зручності експлуатації, обслуговування та ремонту [12, 13];
- забезпечення можливості роздільного і точного регулювання в широких межах основних робочих параметрів процесів зневоднення, залежно від заданих початкових та кінцевих фізико-механічних характеристик оброблюваного матеріалу та інших додаткових виробничих вимог та умов [14, 15, 1];
- наявність засобів захисту робітника-оператора від надмірного шуму та вібрацій при роботі обладнання, запобігання забруднення виробничого повітря, недопустимого підвищення його температури та вологості [16, 17].

Вказані вимоги можна розглядати і як критерії ефективності порівнюваних способів і обладнання для зневоднення вологих дисперсних матеріалів харчових виробництв, а найбільш важливими серед них є: висока продуктивність та безперервність реалізованого процесу, низькі енергоємність, складність, матеріалоемність та вартість обладнання; задані кінцеві фізико-механічні параметри концентрату оброблюваного матеріалу [7, 18].

З врахуванням вищевикладеного, а також на підставі результатів попередньо проведеного аналізу [19, 3], нами була розроблена класифікація відомих способів та обладнання для зневоднення вологих дисперсних матеріалів, представлена на рисунку 1.1.

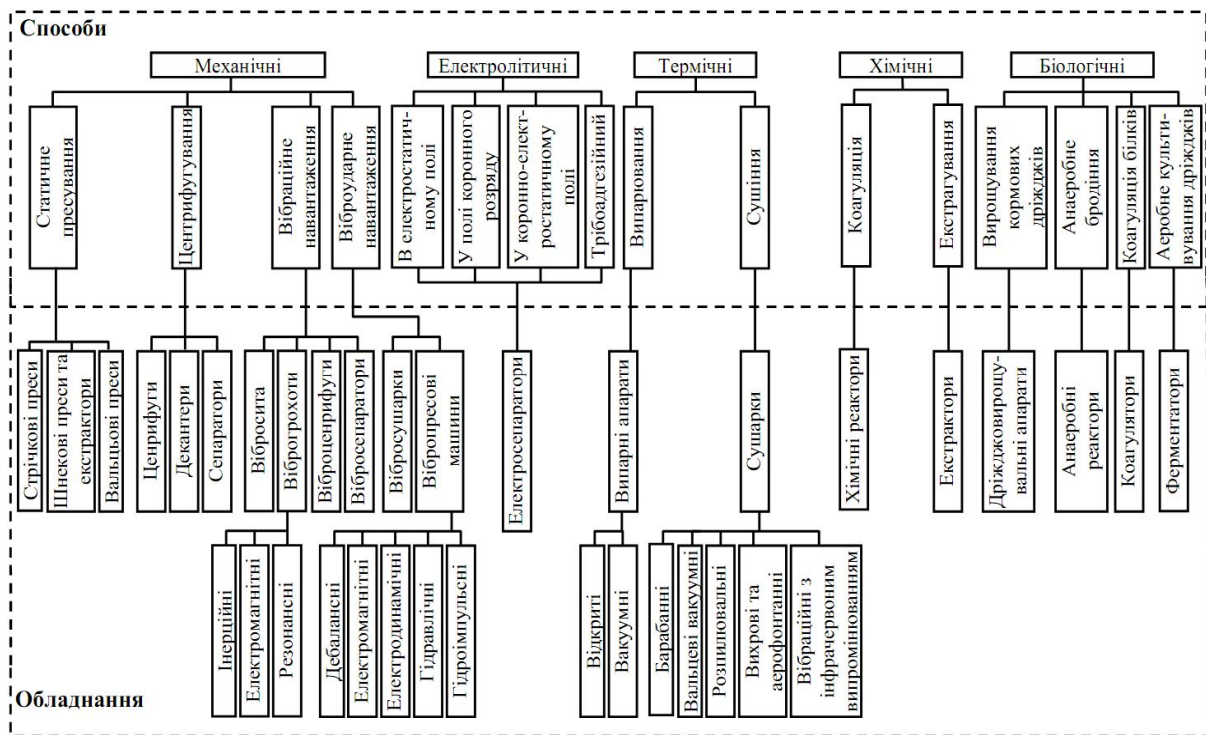


Рисунок 1.1 – Класифікація способів та обладнання для зневоднення вологих дисперсних матеріалів

Класифікація не включає такі відомі механічні способи зневоднення, як відстоювання на ситах [20] та віджимання на статичних пресах періодичної дії з механічним, гідравлічним та пневматичним приводом [21, 22], через їх порівняно низьку продуктивність (тривалість робочого циклу статичного преса 2П-41 – 20 хвилин [23]), неможливість функціонування у безперервному режимі та високу кінцеву вологість концентрату (90 – 92% для виноградного жому після його відстоювання) [24]. Вказані недоліки не дозволяють ефективно використовувати дане обладнання в умовах потокового виробництва.

На рисунку 1.2 представлена схема функціонування стрічкового фільтр-преса L-SBP [25, 26], що використовується для механічного зневоднення ячмінного шламу до вологості 70 – 75%. Фазове розділення оброблюваного матеріалу здійснюється у три послідовні стадії: попереднього зневоднення; ущільнення концентрату під невеликим тиском; пресування під максимальним тиском до 0,8 МПа. Для підвищення ефективності процесу у матеріал попередньо додається флокулянт [28]. Зневоднений осад зрізається ножами. Перевагою даного преса є те, що очищення сітки здійснюється без зупинки машини за допомогою спеціальних труб-розбризкувачів, таким чином продуктивність процесу в часі залишається незмінною [27]. Недоліки: прискорене зношування сітки через значні зусилля її натягу та тертя об ролики; порівняно висока кінцева вологість концентрату оброблюваного матеріалу [29], у зв'язку із чим, дане обладнання може використовуватись лише для попереднього зневоднення.

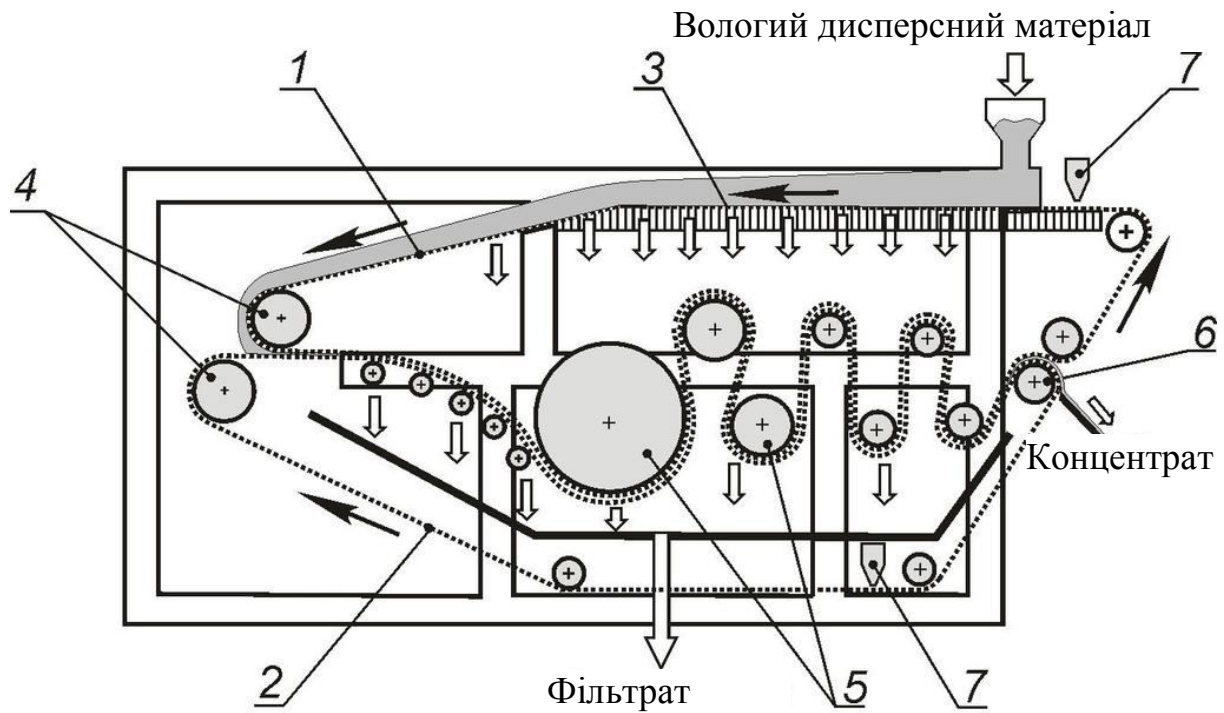


Рисунок 1.2 – Схема функціонування стрічкового фільтр-преса: 1, 2 – верхня та нижня фільтрувальні стрічки; 3 – гравітаційний стіл; 4 – натяжні вали; 5 – віджимні вали; 6 – розвантажувальний вал; 7 – промивання фільтрувальної стрічки

Горизонтальний двошнековий прес Stord BS-64 [26, 30] (рисунок 1.3), використовуваний в основному для зневоднення бурякового жому, складається з бункера 1, шнеків 2, паралельно установлених в горизонтальному корпусі, кришки 3, шестерень 4, 5, насоса 6, редуктора 7, гідромурфи 8, електродвигуна 9. В бункері і кришках установлені фільтрувальні сита з нержавіючої сталі з конічними отворами діаметром 3,9/5 мм. Продуктивність преса та кінцева вологість оброблюваного матеріалу залежать від частоти обертання шнеків, яку можна регулювати за допомогою муфти 8 в діапазоні 1,45 – 3 об/хв. При цьому мінімальна

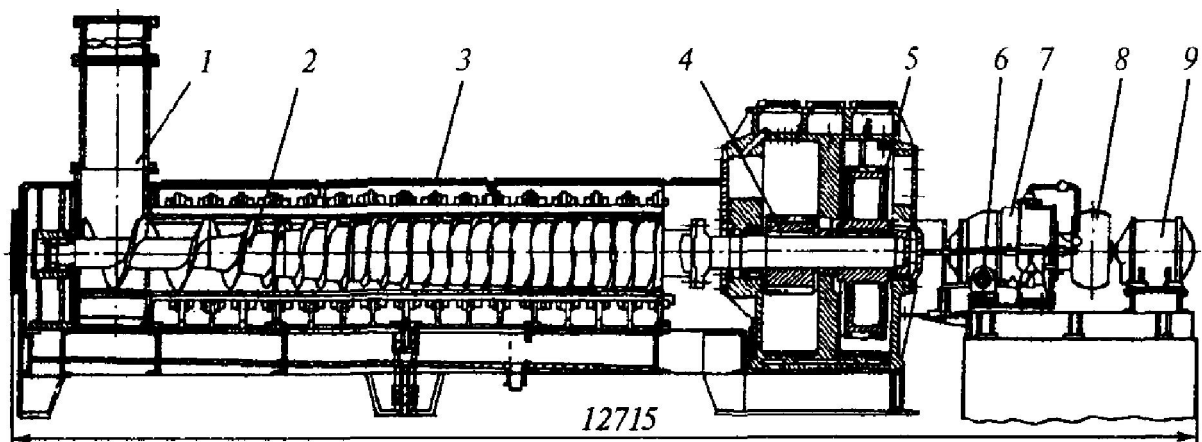


Рисунок 1.3 – Горизонтальний двошнековий прес Stord BS-64

кінцева вологість концентрату жому не менша 30 – 40% [31], але у більшості випадків - 74 – 77% [26].

Екстрактором називають шнековий прес безперервної дії з виконавчим елементом змінного кроку [22]. В цілому дане обладнання є одним з найбільш досконалих для реалізації процесів зневоднення через його високі продуктивність та надійність, простоту конструкції та компактність, високий ступінь механізації та автоматизації. Але і шнековим пресам і екстракторам властивий такий недолік, як достатньо інтенсивні тертя між поверхнями шнеку та твердими частинками оброблюваного матеріалу, без якого неможливе його переміщення. Це обумовлює прискорене зношування шнеку, який є досить нетехнологічним у виготовленні і дорогим елементом, змушує використовувати зносостійкі покриття шнеку, зменшувати навантаження в процесі роботи. Крім цього, фільтрувальні отвори у корпусах шнекових пресів та екстракторів при їх відносно малому діаметрі можуть досить швидко забиватись частинками концентрату оброблюваного матеріалу з подальшим падінням продуктивності процесу. При цьому, промити фільтрувальні отвори не перериваючи процесу зневоднення неможливо [32]. У випадку ж збільшення діаметрів отворів вони будуть пропускати разом з фільтратом і значну частину найдрібніших твердих частинок, що змушує здійснювати його більш тривале та енергоємне багатостадійне очищення [33, 24].

Що стосується гідропресових установок з чашковими пресами, використовуваних для віджимання какао-олії [26], гідропресових пакетних установок (пак-пресів) для видалення соку з фруктово-ягідної мезги [26, 34], гідропресових установок з кошиковими пресами [26] для отримання соку з фруктової та овочевої мезги, то всі вони відносяться до обладнання періодичної дії, яке матиме недостатньо високу продуктивність в умовах потокового виробництва [35, 36].

Вищу ефективність, а головне – безперервність процесу, забезпечують вальцові преси [34] для віджимання води з каниги (рисунк 1.4). Верхній барабан преса 5 установлений на рухомих, а нижній барабан 4 – на нерухомих підшипниках. Підтискання барабана 5 до барабана 4 забезпечується за рахунок сили його тяжіння та зусилля попереднього стискання пружин 6. Канига захоплюється барабанами, що обертаються назустріч і, проходячи між ними, стискається. Нижній барабан виконаний порожнім з отворами у циліндричній поверхні для проходження відпресованої рідини, яка далі збирається у нижній частині корпуса машини та відводиться по трубі 7 у каналізацію. Сухий залишок каниги знімається з поверхонь барабанів шкребком з противагою 8 та потрапляє далі у шнек для виведення з обладнання. Одним з основних недоліків такого обладнання є те, що оброблюваний матеріал в ньому зневоднюється на достатньо малому відрізку шляху (контакт барабанів здійснюється по лінії) і у продовж дуже короткого часу, що разом із порівняно невеликою

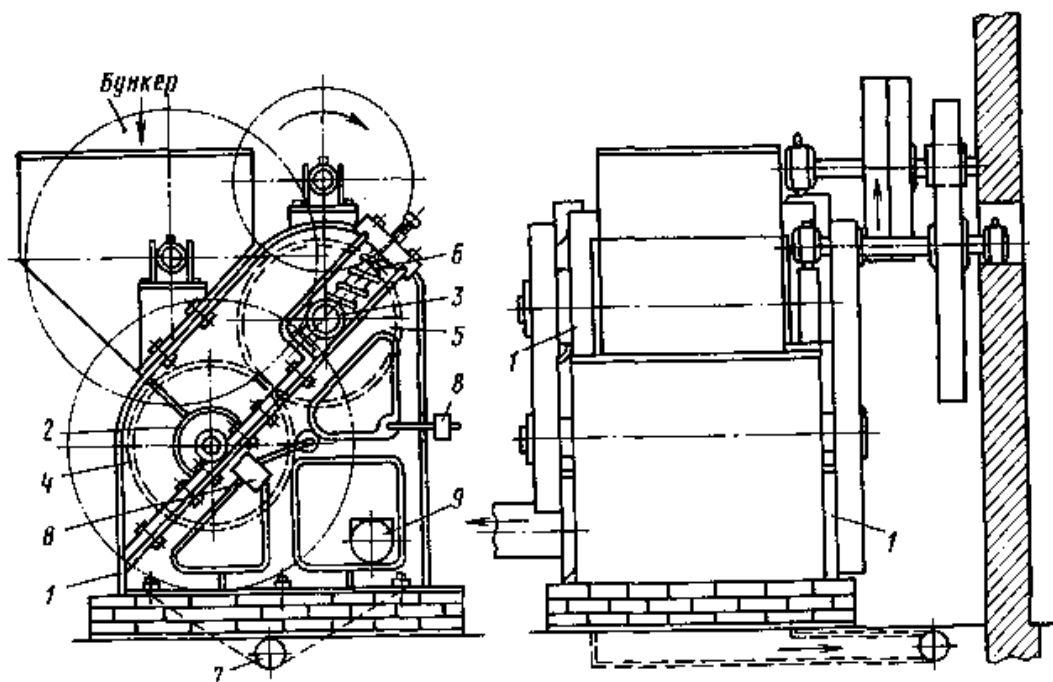


Рисунок 1.4 – Вальцьовий (барабанний) прес

площею відведення фільтрату (площею поперечного перерізу фільтрувальних отворів в зоні контакту), не забезпечує необхідної кінцевої вологості матеріалів [37]. Також фільтрувальні отвори можуть досить швидко забиватись твердими частинками [38, 39].

Ще один механічний спосіб – центрифугування – забезпечує фазове розділення матеріалу в полі відцентрових сил [40]. Для його реалізації використовують в основному центрифуги, сепаратори [40, 33] та декантери.

На рисунку 1.5 показана декантерна центрифуга [41]. Оброблюваний матеріал надходить у барабан 5 через патрубок 10 і далі прискорюється за допомогою розподільника 15. Під впливом відцентрових сил тверді

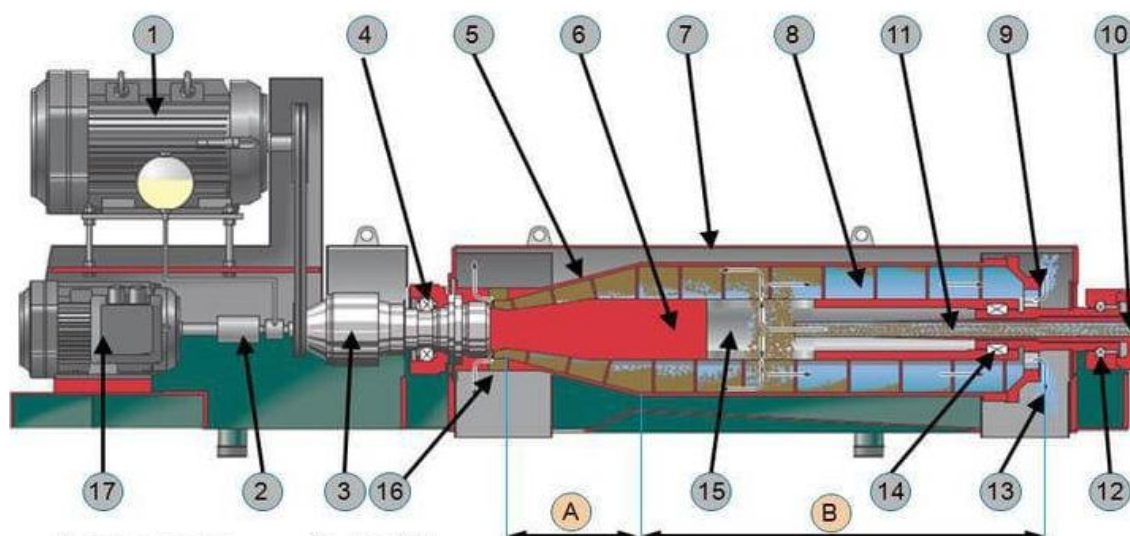


Рисунок 1.5 – Схема декантерної центрифуги

частинки матеріалу відтискаються від осі до стінок барабану і переміщуються шнеком 6 до камери 16. Шнек обертається в ту ж саму що і барабан сторону, але з дещо більшою швидкістю. Пристінковий рух твердих частинок забезпечується завдяки тому, що сили тертя між ними та стінками барабана більші, ніж сили тертя між частинками та поверхнями шнека. Крім цього, на поверхнях конічної частини барабана виконуються поздовжні канали для полегшення осьового переміщення концентрату. Вивантаження зневодненої твердої фази здійснюється через камеру 16, тоді як фільтрат зливається у протилежному напрямку через осьові канали у барабані, регулювальне кільце 9 та камеру 13. Декантери забезпечують досить високу продуктивність робочого процесу при кінцевій вологості концентрату спиртової барди – 72%. Робота даного обладнання повністю автоматизована, контроль та керування з боку робітника зведені до мінімуму. Але декантери є надзвичайно складним за конструкцією, матеріалом та дорогим обладнанням. Так, маса найменш потужного (30 кВт), а отже й найменш продуктивного декантера фірми Alfa Laval – одного зі світових лідерів в галузі розробки та випуску даного обладнання – складає 2750 кг, при габаритах 3390×876×1438 мм [40, 42].

Розглянуті вище у даному підрозділі механічні способи зневоднення відносяться до статичних, оскільки при їх реалізації виконавчі елементи використовуваного обладнання здійснюють рівномірні обертальні чи поступальні переміщення [2, 10, 21]. Як встановлено в роботі [43], при застосуванні даних способів, навіть у випадках дотримання оптимальних режимів, забезпечуються лише місцеві руйнування початкової структури матеріалу. Але для видалення з нього хоча б основної частини структурно зв'язаної рідини, потрібно створити умови для граничного руйнування структури з рівномірним перерозподіленням твердих частинок по об'єму порції [44, 45]. Такі умови можуть бути забезпечені при використанні динамічних механічних способів вібраційного та віброударного навантаження (див. рисунок 1.1), під час реалізації яких виконавчі елементи обладнання здійснюють рухи з прискореннями [46, 47]. Зокрема, при здійсненні на оброблюваний матеріал вібраційних впливів він може перейти у певний оптимальний динамічний стан [46 - 51], параметри якого попередньо визначаються, виходячи із початкових фізико-механічних характеристик матеріалу. При цьому у вказаному стані, в який, залежно від заданих умов обробки переводиться весь об'єм матеріалу або тільки певний його шар, зв'язки між твердими частинками порушуються практично до будь-якого регульованого рівня, значення в'язкості та напружень зсуву матеріалу зменшуються до мінімуму, відбувається його псевдозрідження або псевдокипіння [52]. В результаті пружно-в'язко-пластичні та в'язко-пластичні системи перетворюються у ньютонівські рідини, в'язкість яких, визначається питомою потужністю (інтенсивністю) вібрації [43]. У порівнянні із зневодненням з використанням статичних

способів, забезпечується значне зменшення тривалості та енергоємності процесу. Крім цього, істотно спрощується аналіз процесу, а отже і залежності для розрахунку його оптимальних робочих параметрів та конструктивних параметрів обладнання [43, 47, 50].

Істотним недоліком способу вібраційного зневоднення є те, що під час його реалізації для збереження інтенсивності відокремлення рідини потрібно постійно регулювати робочі параметри вібраційного навантаження згідно із зміною фізико-механічних характеристик оброблюваного матеріалу [43]. Останнє, в свою чергу, вимагає використання досить потужного обладнання, в приводі якого передбачена можливість автоматизованої безступінчастої і точної зміни в широких межах і за заданим, попередньо визначеним законом режиму та основних робочих параметрів навантаження [43, 53]. Таким чином, обов'язковим елементом приводу даного обладнання повинна бути система зворотного зв'язку – досить складний пристрій контролю та керування основними параметрами процесу навантаження у функції від характеристик оброблюваного матеріалу [43]. В деяких випадках, навіть при великій вихідній потужності вібраційного обладнання, реалізувати на ньому потрібну зміну робочого режиму в достатньо широких межах неможливо. Тоді доводиться розділювати процес вібраційного зневоднення на ряд послідовних стадій, кожна з яких здійснюється на окремій одиниці обладнання, що призводить до його дорожчання, а також збільшення витрат часу та енергії на зневоднення оброблюваного матеріалу. Крім цього, ефективність вібраційного навантаження значною мірою обумовлена тим, що перед його реалізацією у матеріал попередньо додаються поверхнево активні речовини (ПАР) [43, 54], наявність яких забезпечує зменшення сил зчеплення між частинками.

Найбільш поширеними видами динамічного вібраційного обладнання, що використовуються в даний момент для зневоднення вологих дисперсних матеріалів є вібраційні сита, грохоти, сепаратори та центрифуги [40, 43, 55, 56]. При цьому рідинна фаза, як вказувалось вище, видаляється у декілька стадій – в процесі попереднього, проміжного та остаточного зневоднення.

Вібросито являє собою циліндричний бункер з конічним днищем (конус вверх) з нержавіючої сітки, з розміром осередків 1...3 мм [55, 56]. Бункер підпружинений відносно рами і приводиться у коливальний рух за допомогою мотор-вібратора. Матеріал, що подається по осі бункера, під впливом вібрацій розтікається до периферії та зневоднюється. Фільтрат стікає у нижній бункер, а концентрат видаляється через тангенціально установлені лотки. Продуктивність при зневодненні навозу з початковою вологістю 97...98 % складає 6...8 т/год; кінцева вологість концентрату – 80...90 % [57]. Але вібросита працюють ненадійно, оскільки швидко забиваються твердою фазою [43, 58].

Віброгрохоти за типом приводу ділять на інерційні (з дебалансними та самобалансними вібраторами, а також з мотор-вібраторами), електромагнітні та резонансні (останні мають як правило ексцентриковий привод) [43, 55]. Крім цього, розглядуване обладнання класифікують на горизонтальне та похиле (залежно від положення сита), на одно- та багатоситове, на дво-, три- і чотиримасове, на грохоти з паралельно- та

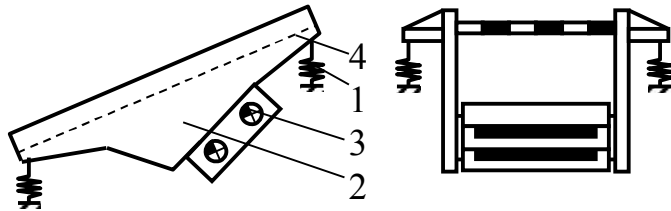


Рисунок 1.6 – Принципова схема інерційного віброгрохота:

- 1 – віброізолювальна пружна підвіска;
- 2 – короб;
- 3 – самобалансний вібратор;
- 4 – сито

послідовно розташованими коробами [59]. Найбільш поширені віброгрохоти з приводом від мотор-вібраторів, що обумовлюється простотою їх конструкції та обслуговування, малими габаритами та високою надійністю, а також можливістю використання уніфікованого вібропривода [43, 56]. В приводах грохотів з

круговими коливаннями виконавчого елемента установлюють один мотор-вібратор; для отримання прямолінійних коливань сита використовуються спарені або самосинхронізовані мотор-вібратори [40, 43, 55]. Застосування мотор-вібраторів з регульованою величиною сили, що збурює і установлення їх під різними кутами по відношенню до площини сита, дозволяють реалізувати оптимальний для зневоднення матеріалу із заданими початковими та кінцевими фізико-механічними характеристиками, режим вібраційного навантаження [43, 55, 60]. На рисунку 1.6 показана принципова схема інерційного похилого односитового віброгрохота [43]. Основним недоліком всіх віброгрохотів, незалежно від їх типу та конструктивного виконання є те, що вони, навіть при тривалій роботі та реалізації максимального навантаження на оброблюваний матеріал, не забезпечують достатньо повного видалення з нього рідини [43, 55]. До цього ж при використанні віброгрохотів основні параметри вібраційного навантаження, а саме частота та амплітуда коливань виконавчого елемента і матеріалу, що на ньому знаходиться, не можуть регулюватись незалежно [43, 61, 62]. Так, наприклад, при збільшенні амплітуди, зменшується частота коливань коробу і навпаки. В результаті, діапазон режимів та параметрів навантаження, що можна реалізувати на цьому обладнанні є порівняно вузьким [43, 56]. Для запобігання прискореного руйнування основ віброгрохотів та фундаментів, на яких вони установлюються необхідна достатньо ефективна і дорога система віброізоляції, крім цього, конструкція обладнання в цілому має бути ретельно зрівноважена [43]. По цій же самій причині запуск віброгрохотів зарезонансного типу потрібно здійснювати під повним

завантаженням, оскільки в іншому випадку можливе надмірне розкачування обладнання під час його переходу через резонансну область [63]. Віброхоти значної вантажопідйомності та продуктивності для умов потокового виробництва доводиться проектувати за схемами резонансного обладнання, тому що тільки в останньому випадку забезпечена належна компенсація сил інерції в тому числі і при коливаннях великих мас, у зв'язку із чим, їх можна запускати як на холостому ходу, так і під навантаженням [43, 55, 56]. Нарешті, основи, фундаменти та елементи привода розглядуваного обладнання, навіть при використанні високоефективної системи віброізоляції, не можуть бути повністю захищені від впливу вібрацій, на створенні яких оснований принцип їх дії і це змушує проводити періодичне обтягування та заміну кріпильних деталей, а також елементів, що швидко зношуються [43, 63].

Більш повне, ніж на віброгрохотах, зневоднення вологих дисперсних матеріалів може бути досягнуто при використанні віброцентрифуг [43, 59], що забезпечують комбіноване відцентрове та вібраційне навантаження матеріалу в двох взаємно перпендикулярних напрямках. В результаті, ефективно руйнуються аркові структури з частинок концентрату, що заважають його достатньо повному зневодненню при використанні способу чистого центрифугування. Тверді частинки постійно і рівномірно перерозподіляються у об'ємі віробункера з поступовим ущільненням і видаленням з каналів між ними фільтрату [43]. На рисунку 1.7 показана принципова схема віброцентрифуги [43, 59] з вертикально розташованим ротором 2, вібрації якого сприяють рівномірному розподіленню по об'єму твердих частинок оброблюваного матеріалу, зниженню його в'язкості та кращому просуванню уздовж стінок виконавчого елемента. Але, віброцентрифуги можуть забезпечити, знов таки, лише попереднє зневоднення вологого дисперсного матеріалу [54, 58, 63].

Нами пропонується для здійснення зневоднення вологих дисперсних матеріалів застосовувати спосіб віброударного інерційного навантаження на обладнанні з гідроімпульсним приводом (ГІП) [64 - 67], який також відноситься до динамічних механічних способів і, згідно із проведеними теоретичними та експериментальними дослідженнями [68 – 71], має порівняно високу ефективність. На рисунку 1.8 представлена гідроімпульсна машина для віброударного зневоднення на базі інерційного вібропрес-молота з ГІП моделі ІВІМ-16 [64, 68]. Попередньо зневоднений до вологості 70% оброблюваний матеріал подається стрічковим конвеєром 9 на стрічку конвеєра 20. Стрічки мають гумовотканинну основу 16 (див. розріз А – А на рисунку 1.8), до якої заклепками 14 прикріплені С-подібні сталеві пластини 13 шириною кожна 30 – 40 мм. У пластинах та основі 16 виконане велике число наскрізних отворів діаметром 3 мм, закритих

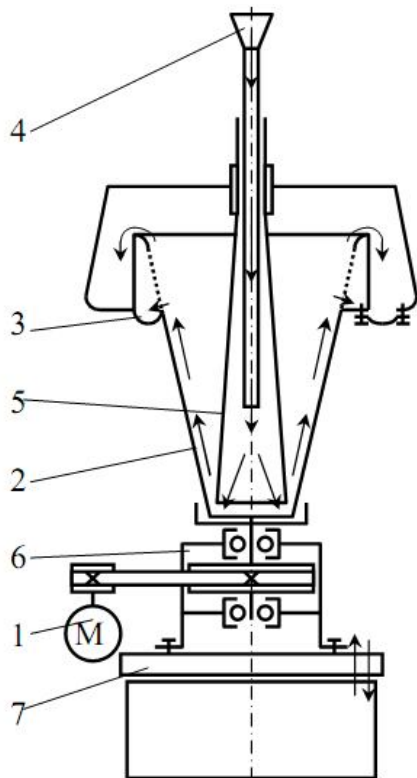


Рисунок 1.7 – Схема віброцентрифуги:

- 1 – електродвигун;
- 2 – фільтрувальний ротор;
- 3 – бункер для фільтрату;
- 4 – трубопровід для подачі оброблюваного матеріалу;
- 5 – розподільний конус;
- 6 – редуктор;
- 7 – вібростенд

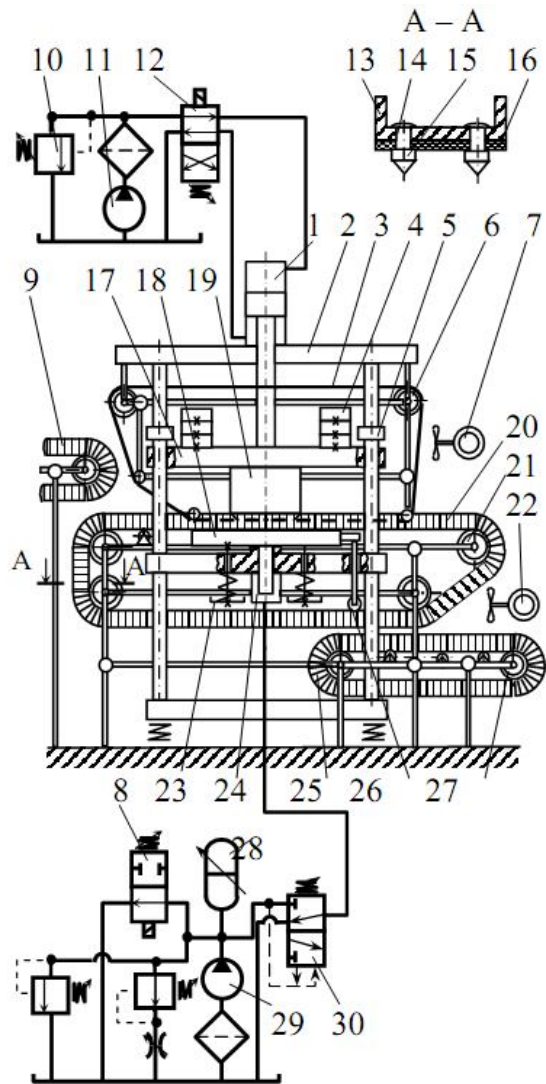


Рисунок 1.8 – Гідроімпульсна машина для віброударного зневоднення на базі вібропреса ІВПМ-16

зверху фільтрувальною тканиною (на схемі не показані). Зневоднення порції матеріалу на стрічці 20 здійснюється у такій послідовності. При вимкнених ГПП (внизу на схемі) та конвеєрах 9, 20 вмикається насос 11 допоміжного привода. Гідророзподільник 12 перемикається у нижню за схемою позицію, робоча рідина від насоса 11 йде під тиском у штокову порожнину допоміжного гідроциліндра 1 (поршнева порожнина сполучена зі зливом). Тиск робочої рідини у штоковій порожнині збільшується, у поршневій - зменшується, в результаті поршень гідроциліндра 1 піднімається вгору. Разом з ним переміщуються траверса 17 з інерційними вантажами 4, а також пуансон 19 квадратного поперечного перерізу. Підйом продовжується до упору траверси 17 у обмежувачі 5. При цьому дві гумово-тканинні стрічки 3 піднімаються над поверхнею вібростолу 18. В момент зупинки траверси 17 вмикається конвеєр 20, привод якого забезпечує барабан 21. У отвори на поверхні останнього входять конічні

головки 15 заклепок 14, тим самим на стрічці забезпечується необхідне тягове зусилля. Матеріал на стрічці 20, під час її руху рівномірно розподіляється по всій ширині пластин 13 за допомогою спеціального ножа (на схемі не показаний). Після зміщення стрічки 20 на відстань, що відповідає ширині пуансона, барабан 21 зупиняється. Гідророзподільник 12 перемикається у верхню за схемою позицію, робоча рідина від насоса 11 йде у поршневу порожнину гідроциліндра 1 (штокова з'єднана з баком). Поршень гідроциліндра 1 і зв'язані з ним елементи опускаються вниз до підтискання пуансона 19 та стрічок 3 до порції оброблюваного матеріалу на конвеєрі 20. За допомогою переливного клапана 10 можна налаштувати зусилля статичного притискання пуансона. Далі вмикається насос 29 ГП, гідророзподільник 8 перемикається у верхню за схемою позицію, таким чином, злив робочої рідини від насоса 29 у бак перекривається. Тиск робочої рідини у порожнині одноциклового гідроаккумулятора 28 та у підсистемі ГП до вібробуджувача 30 [64], підключеного за схемою «на вході» [72 – 74], починає збільшуватись. Вібробуджувач на даному етапі циклу спрацьовування ГП знаходиться у верхній за схемою позиції і забезпечує з'єднання порожнини гідроциліндра 24 зі зливом. Тиск в ній робочої рідини невеликий, таким чином плунжер гідроциліндра 24 знаходиться у вихідному нижньому положенні, вібростіл 18 притиснений пружинами 23 до запліччя середньої поперечини станини вібропреса 2. В момент збільшення тиску робочої рідини у порожнині гідроаккумулятора 28 до величини p_1 , яку можна попередньо налаштувати, вібробуджувач 30 відкривається (перемикається у нижню за схемою позицію). Робоча рідина від насоса 29 та з порожнини гідроаккумулятора 28 надходить у порожнину гідроциліндра 24. Тиск в останній різко збільшується, в результаті плунжер гідроциліндра ГП і разом з ним вібростіл 18, ділянка стрічки 20 на ньому, стрічки 3, порція матеріалу під пуансоном 19 і сам пуансон, а також рухома траверса 17 з вантажами 4 зміщуються вгору. При цьому стискаються пружини 23, а порція оброблюваного матеріалу піддається інерційному навантаженню з боку пуансона, траверси та вантажів 4. Видалена з матеріалу рідина витікає через отвори у стрічці 20 та вбирається у стрічки 3, покриті для цього рідинно-поглинальним шаром. В момент падіння тиску робочої рідини у порожнині гідроаккумулятора до мінімальної величини p_2 , вібробуджувач 30 закривається (перемикається у верхню за схемою позицію), плунжер гідроциліндра 24, інші рухомі елементи вібропреса та порція матеріалу між стрічками 3, 20 під дією сили власного тяжіння та сили пружності пружин 23 опускаються вниз, з ударом наприкінці ходу вібростолу 18 об запліччя поперечини станини. В результаті оброблений матеріал піддається ударному навантаженню знизу. Описаний цикл спрацьовування ГП повторюється раз за разом до забезпечення заданої кінцевої вологості концентрату (оптимальна тривалість віброударного навантаження порції матеріалу або потрібна

кількість його циклів визначаються дослідним шляхом). Після цього ГП вимикається, гідророзподільник 12 перемикається у нижню позицію і після підйому траверси 17 з пуансоном і вантажами до упору в обмежувачі 5, вмикаються конвеєри 9, 20, 27. Чергова порція матеріалу, що підлягає зневодненню скидається зі стрічки 9 на конвеєр 20; порція що вже знаходилась на конвеєрі 20 надходить у простір під пуансоном; зневоднена порція скидається на конвеєр 27. При цьому праві за схемою бокові гілки стрічок 20 і 3 обдуваються вентиляторами 7, 22 і підсушуються. Після зміщення стрічок конвеєрів на величину, що відповідає ширині пуансона 19, вони зупиняються; починається процес зневоднення наступної порції оброблюваного матеріалу. Під час коливань вібростолу 18 зв'язаний з ним ролик 26 струшує нижню гілку стрічки 20 для звільнення її від залишків зневодненого концентрату, що скидається на конвеєр 27. Керування роботою електродвигунів конвеєрів, ГП та допоміжного привода, а також перемикання гідророзподільників можуть бути автоматизованими за допомогою реле часу [6, 75].

За участю автора були проведені експериментальні дослідження зі зневоднення на гідроімпульсному стенді, створеному на базі вібропреса ІВПМ-16, концентрату кавового шламу (див. підрозділ 2.1). При початковій висоті порції, що знаходилась у прес-формі закритого типу – у 0,01 м, кінцева вологість концентрату пивної дробини не перевищувала 25%, а робочий час процесу обробки складав від 20 до 25 с. Теоретично висока ефективність пропонованого способу віброударного зневоднення докладно обґрунтована у підрозділі 4.1.

При цьому ГП є одним з найбільш придатних типів привода для вібропресового обладнання [64, 65, 74] (див. рисунок 1.1), 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 дороги, чутливі до засмічення, крім цього, створюють при роботі навколо себе потужні електромагнітні поля [64, 65, 76].

Розробки гідроімпульсного обладнання різного призначення, а також дослідження релізованих з його допомогою технологічних процесів проводились Р.Д. Ісковичем-Лотоцьким, І.Б. Матвєєвим, Р.Р.Обертюхом та іншими [64, 65, 74].

Способи зневоднення наступної групи розглядуваної класифікації (див. рисунок 1.1) – електролітичні – відрізняється високою енергоємністю та порівняно низькою продуктивністю під час реалізації [77 - 79]. Наприклад, електростатичне розділення основане на різниці електропровідності і здатності до електризації тертям (трібоелектричний ефект) мінеральних частинок оброблюваного матеріалу. При невеликій різниці в електропровідності частинок використовують електризацію їх

тертям. Наелектризовані частинки направляють в електричне поле, де відбувається їх розділення. У зв'язку із відміченими вище недоліками, електролітичні способи використовуються в основному для розділення у невеликих кількостях первинних продуктів харчових виробництв [21, 27, 77].

Термічні способи (див. рисунок 1.1) є найбільш енергоємними і можуть бути рекомендовані лише для остаточного зневоднення тих матеріалів, у яких більша частина структурно зв'язаної рідини вже відокремлена [2, 80, 81]. Одним з найбільш ефективних способів даної групи є випарювання у вакуумі – видалення з оброблюваного матеріалу рідини під час його кипіння при температурі, нижчій за 100 °С і тиску, нижчому за атмосферний [22, 82]. На рисунку 1.9 показана схема трикорпусної вакуум-випарної установки [22], в якій за рахунок повторного використання пари для нагрівання 2-го і 3-го корпусів, знижені витрати енергії на реалізацію процесу в цілому. Перед подачею у 1-й корпус матеріал попередньо нагрівається до температури кипіння у

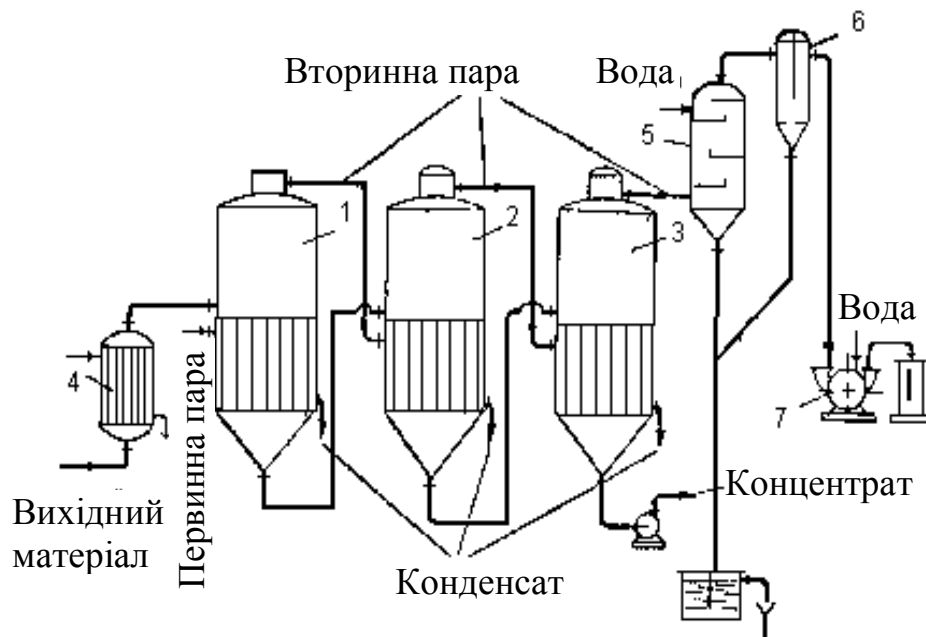


Рисунок 1.9 – Схема багатокорпусної прямооточної вакуум-випарної установки: 1, 2, 3 – основні корпуси; 4 – резервуар попереднього нагрівання; 5 – конденсатор; 6 – краплеуловлювач; 7 – вакуум-насос

резервуарі 4. Далі, за рахунок того, що тиск у 2-му корпусі нижчий, ніж у 1-му, матеріал самопливом переміщується у нього і продовжує кипіти і випарюватись при нижчій температурі. Аналогічний принцип покладений в основу функціонування 3-го корпусу. Але, навіть найсучасніші установки для низькотемпературного випарювання спиртової барди у вакуумі [83, 84, 85] мають досить посередні показники ефективності: продуктивність за сухим концентратом вологістю 8% - 12 т/добу,

установлену потужність – 37 кВт; площу у плані – 30 м²; висоту – 6 м; витрати теплоти на 1 т випареної рідини – 0,63 Гкал (732 кВт год) [22]. Порівняно висока енергоємність процесів випарювання обумовлена тим, що в ході їх здійснення, в міру зростання в'язкості матеріалу проходження через нього рідини та пари, навіть при реалізації примусового перемішування [86], істотно погіршується. Крім цього, у випадках зневоднення барди до вологості нижчій 70%, на поверхнях нагрівних елементів інтенсифікується утворення нагару [87]. Розглядуване обладнання відрізняється високою вартістю, конструктивною складністю та значними габаритами [88, 89] (наприклад для трикорпусної установки фірми «Манзіні» [22] вони складають 8360×3000×6125 мм. Для забезпечення його автоматизованого контролю та керування застосовуються складні прилади та пристрої – вакуумметри, циферблатні термометри, мановакууметри, електронні рефрактометри, датчики та електронні регулятори рівня, електромоторні клапани, повітряні крани, пневмоавтоматика [90, 91, 92]. При виготовленні корпусів, нагрівних елементів та інших деталей вакуум-апаратів використовують в основному дорогі матеріали (мідь, бронзи, латуні, леговані сталі) [3, 93], що мають високу механічну міцність і водночас є хімічно стійкими до впливу органічних кислот та їх солей, які містяться у оброблюваних харчових матеріалах. Для запобігання деформування та руйнування стінок циліндричного корпусу вакуум-апарату в ході процесу зневоднення вони повинні мати достатню товщину (запас міцності), а відхилення від циліндричності стінок має знаходитись в допустимих межах. До цього ж, випарювання з матеріалів харчових виробництв рідинної фази супроводжується різноманітними і не завжди бажаними фізико-хімічними реакціями, враховуючи те, що відокремлений концентрат може у подальшому використовуватись як харчова добавка. Зокрема, під впливом тепла відбувається коагуляція білків, розпад пектинових речовин, карамелізація цукру тощо. Компоненти, що входять до складу випарюваного матеріалу залежно від режиму та параметрів процесу вступають у взаємодію і це впливає на швидкість та ступінь фізико-хімічних змін [22, 94, 95].

Серед сушарок найбільш придатними для перероблювання розглядуваних матеріалів є вальцеві, розпилювальні та барабанні сушарки [22, 96, 97].

На рисунку 1.10 представлена схема двовальцевої сушарки [11]. Оброблюваний матеріал подається по трубі 7 у проміжок між вальцями 9, що обертаються у протилежні сторони з частотою 6 – 8 об/хв і обігріваються з середини насиченою парою, яка подається під тиском 350 – 400 кПа. Матеріал захоплюється вальцями і за 8 – 10 с висушується до вологості не більшою 10%, після чого зрізається ножами 5 та скочується по похилих стінках 10. Продуктивність двовальцевих сушарок за випареною

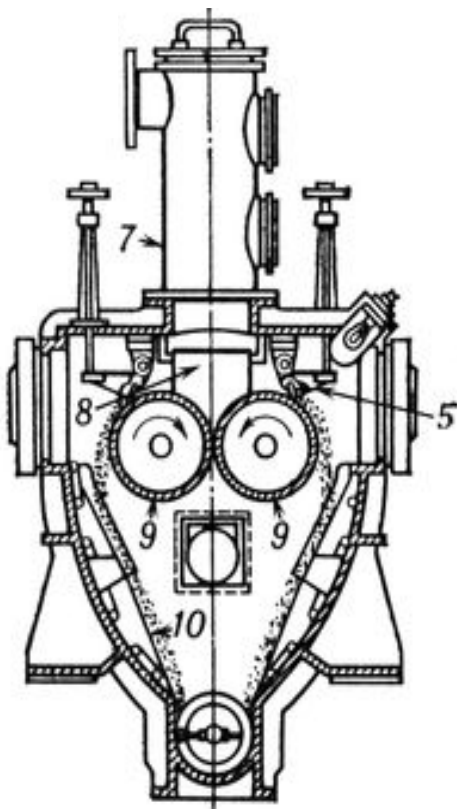


Рисунок 1.10 – Двовальцева вакуум-сушарка

рідиною (при зневодненні спиртової барди під час виробництва сухих кормових дріжджів [98]) може складати від 1 до 3,2 т/год. На 1 кг випареної рідини витрачається 1,7 кг пари. Розпилювальні сушарки є більш енергоємними і менш продуктивними, ніж вальцеві, крім цього, певна частина матеріалу, що через них проходить налипає на внутрішніх поверхнях камери та уноситься разом з повітрям назовні [22, 99]. Барабанні сушарки [26] ще менш економічні. Вихрові та аерофонтанні сушарки відрізняються складністю конструкції та значними габаритами [100 – 103].

Реалізація хімічних способів зневоднення вологих дисперсних матеріалів передбачає додавання до них різних реактивів (сірчаної кислоти або екстрагентів), нагрівання або кип'ятіння одержаної суспензії та видалення твердої фази центрифугуванням або фільтруванням [104, 105]. Одним з основних хімічних способів є коагуляція [77] – штучне укрупнення твердих частинок оброблюваного матеріалу шляхом об'єднання їх у агрегати; при цьому також змінюються їх форми зв'язку з рідинною фазою і покращується водовіддача. Далі тверді частинки випадають в осад і видаляються. Коагуляція реалізується шляхом додавання до матеріалу мінеральних або органічних сполук – коагулянтів чи флокулянтів [45, 51]. Переваги – простота процесу та обладнання. Як мінеральні коагулянти застосовуються 10% розчини солей заліза (найчастіше хлорного заліза), алюмінію або вапна. Недоліки даних сполук – дефіцитність, висока вартість, труднощі з їх приготуванням, зберіганням, транспортуванням та дозуванням, крім цього, вони призводять до швидкої корозії внутрішніх поверхонь резервуарів обладнання для зневоднення [45, 105]. У зв'язку із цим за кордоном замість мінеральних коагулянтів все частіше застосовують синтетичні флокулянти – поліелектроліти або полімери, частинки яких мають електричні заряди, що є протилежними зарядам частинок концентрату. Таким чином, відбувається взаємне притягування частинок, їх агрегування та більш інтенсивне осідання [106].

Екстрагування являє собою процес фазового розділення оброблюваного матеріалу за допомогою вибіркового (селективного) розчинників (екстрагентів) і включає три послідовні стадії: змішування

матеріалу з екстрагентом; механічного розділення (розшарування) двох фаз; видалення екстрагенту з обох фаз та його регенерацію з метою повторного використання [107].

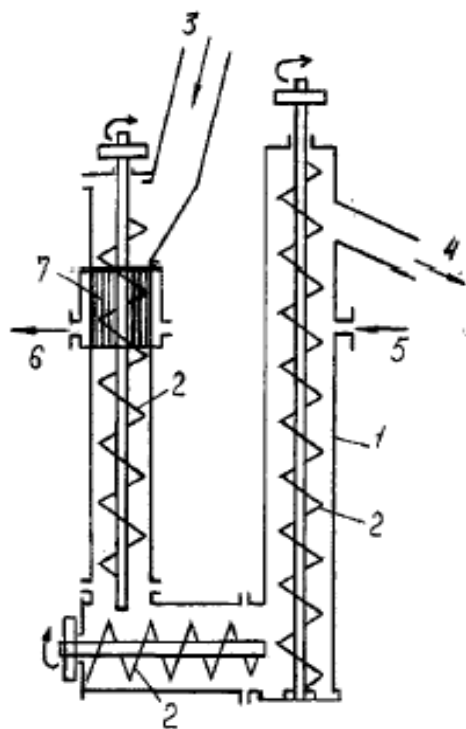


Рисунок 1.11 - Безперервний протитоковий екстрактор:

1 – корпус; 2 – шнеки; 3 – подача матеріалу; 4 – процесу, додаткові витрати на дорогі відведення концентрату; 5 – реактиви та порівняно висока кінцева введення екстрагенту; 6 – вологість оброблюваного матеріалу відведення екстрагенту; 7 – фільтр

Після механічного розділення одержують розчин твердої фази в екстрагенті (екстракт) та залишок вихідного матеріалу (рафінад). Перевагами екстрагування є порівняно низькі робочі температури, висока рентабельність основного процесу, простота використовуваного обладнання та можливість його автоматизації [33]. Недоліки екстрагування це: неможливість в ряді випадків повного видалення екстрагенту з матеріалу [21, 24]. Крім цього, в результаті одноразового екстрагування не забезпечується достатньо високий ступінь його розшарування, у зв'язку із чим часто здійснюють багатостадійне змішування взаємодіючих фаз під час їх зустрічного руху (рисунок 1.11) [108].

Загальними недоліками хімічних способів зневоднення є: часто досить низька продуктивність процесу, додаткові витрати на дорогі реактиви та порівняно висока кінцева вологість оброблюваного матеріалу відведення екстрагенту (порядку 60% для фруктової макухи) [77, 104, 109].

До біологічних способів зневоднення відноситься вирощування кормових дріжджів на мелясній барді, що являють собою високоефективну добавку до сільськогосподарських кормів (вміст білка у даному продукті може перевищувати 45 – 46%). Фактично цей спосіб є комбінацією механічного, біологічного та термічного способів зневоднення [21, 78]. На рисунку 1.12 показана апаратно-технологічна схема процесу вирощування кормових дріжджів на мелясній барді [98]. Гаряча барда температурою 98 – 100 °С, що виходить з бражної колони, подається у збірник-стерилізатор 2 і далі через фільтри – на пластинчасті теплообмінники 24 для охолодження до $t = 25 - 35$ °С. Охолоджена барда надходить у чан-змішувач 3, куди одночасно зі збірника 1, через витратний збірник 25 подаються розчини солей для одержання живильного середовища. Останнє зі змішувача 3 перекачується у дріжджовирощувальний апарат 5, дріжджанку 20 та дріжджогенератор 4. У дріжджанці на живильному середовищі безперервно вирощуються

маточні дріжджі. Для засіву у дріжджанку, в апаратах 21, 22, 23 вирощується чиста культура дріжджів на стерилізованому мелясному суслі, що надходить з основного виробництва. За допомогою стисненого

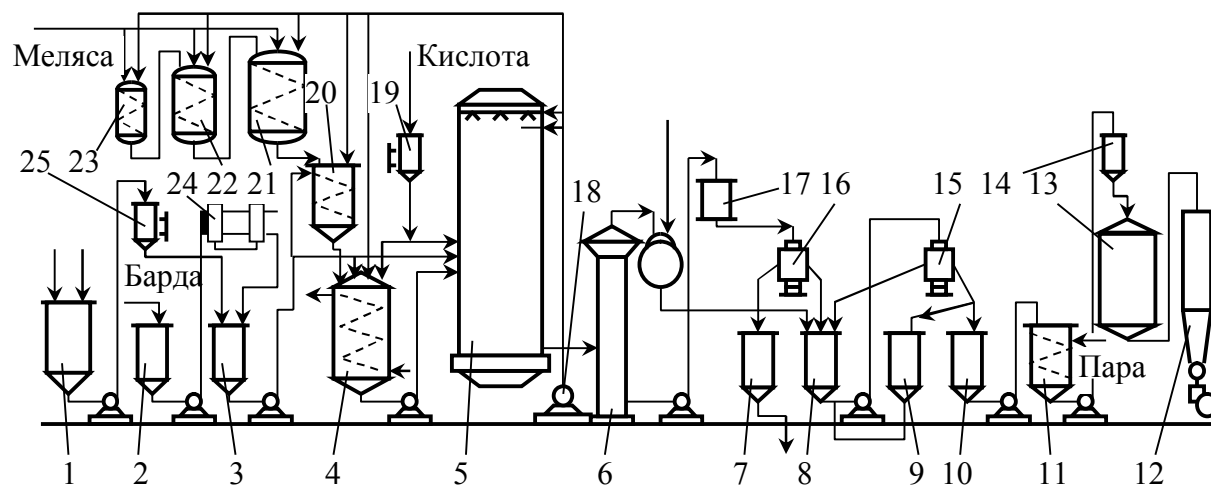


Рисунок 1.12 - Апаратурно-технологічна схема виробництва кормових дріжджів

повітря дріжджі передаються у дріжджанку 20, з якої зливаються самопливом або перекачуються насосом у дріжджогенератор 4. Живильне середовище насичується повітрям, що надходить з повітродувної машини 18. Дріжджова бражка відбирається з апарата 5 та безперервно передається в деемульгатор 6 для руйнування піни. Очищена бражка насосом через фільтр 17 подається на перший ступінь зневоднення 16, а з нього - у збірник 8, куди одночасно прямує зріджена піна від піногасія 6. Для дотримання заданого рН у дріжджовирощувальні апарати зі збірника 19 подається кислота. Сепаратори об'єднують у дві групи, по три апарати в кожній для здійснення роздільного згущення дріжджів на першому та другому ступенях. Для транспортування та миття барабанів сепараторів установлені монорейка з тельфером та ванна. Дріжджова суспензія з концентрацією 100 – 150 г/л зі збірника 8 перекачується у сепаратор 15 для кругового розділення зі згущенням до концентрації 400 – 450 г/л. Готова суспензія накопичується у збірниках 9, 10, звідки йде у плазмолізатор 11. Тут у нагрітому до 75 – 80 °С стані вона витримується у продовж 1 год, відкачується насосом у витратний збірник 14, звідки подається у сушарку 13. Знедріжджена барда прямує до збірника 7. Висушені дріжджі разом з потоком стисненого повітря подаються у бункер 12, з якого надходять на автоматичну вагу та упаковуються і зашиваються у крафт-мішки. Пластинчасті або трубчасті теплообмінники забезпечують охолодження барди перед її змішуванням з розчином живильних солей у змішувальному чані. Недоліками розглядуваного способу є значні складність та тривалість реалізованих процесів, а недоліками обладнання для його здійснення – конструктивна складність, а також висока вартість виготовлення та

експлуатації [98, 104]. Для забезпечення узгодженої та безвідмовної роботи всіх елементів комплексу (див. рисунок 1.12), заданих показників якості дріжджів, необхідна велика кількість пристроїв та приладів контролю та регулювання, а також система автоматизованого керування обладнанням [4, 6, 8]. В цілому процеси біологічного зневоднення вологих дисперсних матеріалів вимагають значних витрат електроенергії, води, стисненого повітря, хімікатів, продукту основного виробництва. Виконавчі поверхні пластинчастих теплообмінників для охолодження барди, в процесі роботи досить швидко забруднюються твердими частинками матеріалу та солей, у зв'язку із чим, виникає потреба в їх періодичному очищенні або промиванні. Необхідне також суворе дотримання правил технічної експлуатації теплообмінників [98]. Розглядуване обладнання відрізняється значними потужністю та габаритами при порівняно низькій продуктивності роботи; для виготовлення його елементів застосовуються в основному високолеговані сталі, бронза, латунь, алюміній [13, 14, 110]. Так, на заводах потужністю понад 4000 дал спирту за добу установлюють дріжджовирощувальні апарати об'ємом 600 м³. При цьому витрати повітря на аерацію складають 50 – 65 м³ на 1 м³ оброблюваного матеріалу, а оборот апарату (тривалість перебування в ньому матеріалу) дорівнює 12 год і більше [98]. Апарат оснащується турбоповітрядувною машиною ТВ-175-1,6 продуктивністю 10000 м³/год повітря, з електродвигуном потужністю 250 кВт.

Спосіб перероблення спиртової барди на біогаз [111, 112] оснований на анаеробному (без доступу кисню) бродінні матеріалу. Барда подається у спеціальні ємності, в які також вводяться анаеробні бактерії, що поїдають наявні у матеріалі живильні речовини і виробляють біогаз. Останній може бути утилізований у заводських котельнях, тоді як твердий залишок – застосований як добриво. Перевагою даного способу є відносно низькі експлуатаційні витрати. Однак для його реалізації необхідні величезні метантенки, оскільки процес анаеробного бродіння є вкрай повільним [109, 111]. Другим недоліком способу є значна тривалість періоду виходу обладнання на робочий режим – до 6 місяців [40, 109, 113].

Ще один біологічний спосіб – коагуляції білків – також реалізується у комбінації з іншими способами зневоднення [114]. Так, у сучасному сільському господарстві зелені корма перед зберіганням та використанням як правило розділюються на дві складові: жом та клітинний сік, який можна споживати тваринам безпосередньо, консервувати шляхом додавання хімоксервантів або вилучати з нього протеїнову фракцію, що також є цінним кормом [37, 39, 111]. Виділення з віджатого на шнековому пресі соку білкових речовин, здійснюється шляхом послідовного нагрівання його до температури 90 – 92 °С у теплообміннику та у пароконтактному або електродному коагуляторі. Далі проводиться відціджування коагуляту на ситах або тканинному фільтрувальному

транспортері до вологості 86 – 90%, пресування на фільтр-пресі до вологості 65 – 72%, формування у гранули розміром 3 – 5 мм та сушіння останніх у низькотемпературній конвеєрній або у розпилювальній сушарці. При цьому вихід соку з початкової маси трави складає 55%, вміст сухих речовин у соку – 6%, половину з яких можна виділити з коагулятом у вигляді протеїнового концентрату. Коричневий сік містить 3% сухих поживних речовин, що можуть бути використані при силосуванні соломи в натуральному вигляді, як добавка до жому після згущення у випарному апараті до вмісту сухих речовин 50%, при гранулюванні та брикетуванні кормів, або вирощуванні кормових дріжджів та антибіотиків [37, 111]. Недоліками описаного способу є, знов таки, висока складність та дорожнеча в реалізації [39].

Дещо інша технологія перероблення спиртової барди, запропонована нещодавно фірмами "СпиртПриборСервис-Наладка" та "АМТ" [111]. Її основними етапами є розділення рідинної та твердої фаз у декантерній центрифугі, аеробне культивування дріжджів на фільтраті, концентрування біомаси та змішування її з твердою фазою, а також сушіння матеріалу у роторно-трубчастих печах, в яких енергоспоживання є в 4 – 6 разів меншим, ніж в розпилювальних сушарках. Все використовуване при цьому обладнання випускається серійно. Кінцевим продуктом є сухий дріжджовий кормоконцентрат (ДКК) з вмістом білка 44%, з високою засвоюваністю тваринами та з харчовою цінністю, що за ГОСТ 20083 – 74 [111] відповідає дріжджам першої категорії.

1.2 Дослідження процесів зневоднення вологих дисперсних матеріалів

Основою для досліджень процесів віброударного зневоднення можуть послужити деякі положення та моделі реології вологих дисперсних матеріалів [115, 116], їх статичного пресування [34, 117], вібраційної обробки [53, 63, 118], а також елементи резонансно-структурної теорії віброударного інерційного пресування сухих непластичних порошоків [64, 119].

1.2.1 Реологія вологих дисперсних матеріалів

Деформації і текучість вологих дисперсних матеріалів під час механічних впливів на них, в тому числі і під час зневоднення вивчає відповідний розділ реології, розроблений у роботах Є. Є. Бібіка [120], К. П. Гучкова [121], В. Н. Покровського [122]. Але, як відзначається у роботі [121], до створення реологічних моделей реальних систем слід підходити обережно, оскільки у випадку врахування в них всіх чи майже всіх властивостей матеріалу, модель може виявитись неприйнятно складною для аналізу, якщо ж не брати до уваги більшу частину властивостей, модель буде некоректною [123].

Згідно із класифікацією академіка П. А. Ребіндера [124], тверді частинки розглядуваних вологих дисперсних матеріалів (відходів харчових виробництв) являють собою колоїдні капілярно-пористі тіла [121], оскільки після видалення з них рідини та стискання вони частково проявляють еластичність, частково руйнуються.

За класифікацією П. А. Ребіндера, доповненої М. Ф. Казанським [125] всю рідину, що міститься у колоїдних капілярно-пористих тілах, за величиною енергії зв'язку E можна поділити на [126]: вільну; капілярно-зв'язану (фізико-механічним зв'язком); адсорбційно-зв'язану (фізико-хімічним зв'язком); хімічно-зв'язану. Найбільш міцно утримується хімічно-зв'язана рідина, оскільки її молекули входять до складу твердої фази і видаляються за допомогою хімічних взаємодій або прожарюванням. Фізико-хімічні, в тому числі й осмотичні взаємодії виникають між рідинними та твердими частинками, які знаходяться у безпосередньому контакті. При цьому молекули рідини залишаються самостійними та ізольованими (хоча й утримуваними біля молекул твердих частинок) і можуть відокремлюватись випарюванням, десорбцією або дезадсорбцією [124]. Тверді частинки, поглинаючи дану рідину, збільшують свої розміри, але об'єм набухлої системи $W_{н.с}$ є меншим суми об'ємів твердої W_m та рідинної W_p фаз. Різниця $\Delta W = W_m + W_p - W_{н.с}$ являє собою величину стискання (контракції) системи. Видалити адсорбовану та осмотичну рідину в межах гігроскопічної вологості [127] за допомогою відомих механічних способів зневоднення в деяких випадках можливо [43], але це вимагає значних витрат енергії та часу [71]. Що стосується вільної рідини, а також рідини, яка має з твердими частинками зв'язки фізико-механічного характеру, то вона займає у розглядуваних матеріалах понад 65% всього об'єму рідинної фази і відокремлюється достатньо ефективно [128, 129].

До основних реологічних фізико-механічних характеристик вологих дисперсних матеріалів при реалізації процесів їх механічного зневоднення слід віднести [130]: пружність, пластичність та в'язкість. Крім цього, мають враховуватись когезія, адгезія і внутрішнє тертя між частинками матеріалу [130]. Когезією називають міжмолекулярні взаємодії частинок одної фази; адгезією – аналогічні взаємодії частинок різних фаз [124, 129]. При цьому міцність твердих частинок не береться до уваги, оскільки доводити їх до руйнування під час зневоднення є вкрай небажаним. По-перше, це вимагає додаткових витрат енергії, по-друге, ускладнює подальше фільтрування матеріалу [131]. Що стосується твердості та ламкості, то у твердих частинок розглядуваних матеріалів у стані, в якому вони знаходяться, дані властивості практично відсутні [132, 133]. У динамічних процесах, в тому числі під час вібраційної та віброударної обробки, слід враховувати також інерційні властивості оброблюваного матеріалу [130].

У реальних вологих дисперсних матеріалах в процесі їх статичного або динамічного навантаження вказані вище фізико-механічні характеристики моделюються за допомогою комбінацій тіл Гуку, Ньютона та Сен-Венана, що відображують відповідно пружність, в'язкість та пластичність матеріалу [130] (рисунок 1.13). Найбільш відомими моделями складних структур, побудованих на основі даних простих тіл ϵ : в'язко-

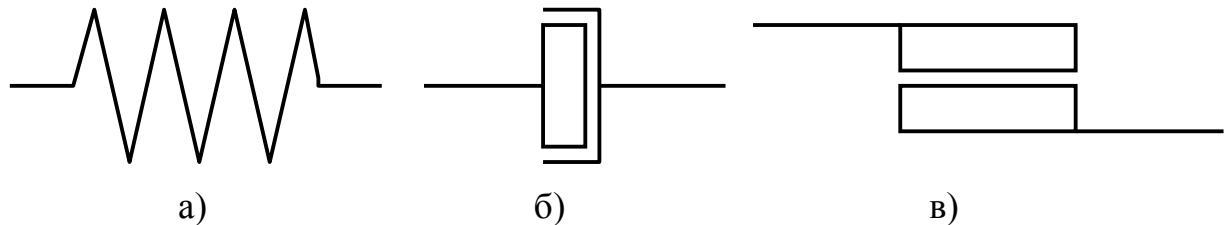


Рисунок 1.13 – Моделі тіла Гуку (а), Ньютона (б) та Сен-Венана (в)

пластична модель Шведова-Бінгама, пружно-в'язкі моделі Кельвіна та Максвелла, пружно-в'язко-пластична модель Бінгама тощо [130, 134].

У деяких з цих складних моделях прості реологічні тіла можуть бути сполучені один з одним послідовно та паралельно (рисунок 1.14) [135].

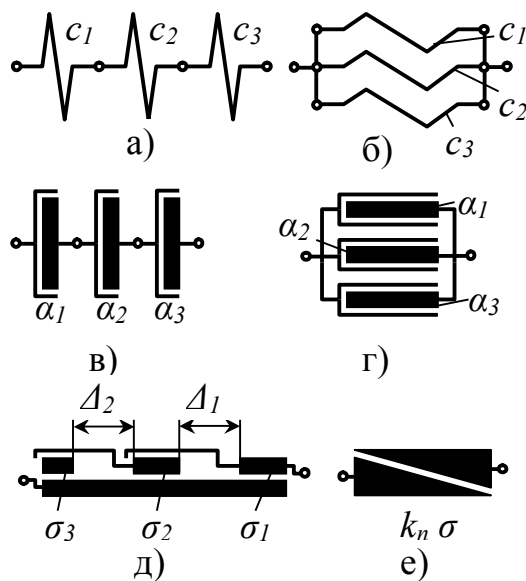


Рисунок 1.14 – Послідовні і паралельні з'єднання пружних (а, б), в'язких (в, г) та пластичних (д, е) елементів

Прості реологічні тіла без інерційних елементів, сполучені послідовно, діють як ланки одного ланцюга і тому повинні сприймати однакове напруження, тоді як деформація всієї послідовності реологічних тіл буде дорівнювати сумі деформацій кожного тіла. При паралельному з'єднанні прості реологічні тіла без інерційних елементів сприймають однакові деформації, а загальне напруження, яку сприймає їх сукупність, є сумою напружень, що сприймається кожним окремим тілом [130]. Таким чином, результуюча жорсткість при послідовному та паралельному з'єднанні елементів (див. рисунок 1.14, а, б) визначається відповідно як [136]

$$c_{\Sigma} = \frac{l}{\frac{l}{c_1} + \frac{l}{c_2} + \frac{l}{c_3}}; c_{\Sigma} = c_1 + c_2 + c_3. \quad (1.1)$$

В цілому розглядувані матеріали являють собою найскладніші у реологічному відношенні пружно-в'язко-пластично-інерційні системи і

можуть бути описані за допомогою феноменологічних механо-реологічних моделей [43, 137], приклад якої показаний на рисунку 1.15. На моделі позначені: c_x, c_x – коефіцієнти жорсткості оброблюваного матеріалу відносно осей x, y ; α_x, α_y – коефіцієнти в'язкого демпфірування матеріалу відносно осей x, y ; $\sigma_{x,y}$ – межа текучості матеріалу відносно осей x, y ; m – маса порції матеріалу. Ущільнення матеріалу відносно осей x, y моделюється клиновими елементами та передавальним відношенням $i_{x,y}$ [138].

Вологістю U розглядуваних матеріалів [127] називають відношення маси m_p рідинної фази, що міститься у порції матеріалу, до маси порції m_m

$$U = \frac{m_p}{m_m} = \frac{m_p}{m_m} + m_p, \quad (1.2)$$

де m_m - маса абсолютно сухої твердої фази порції.

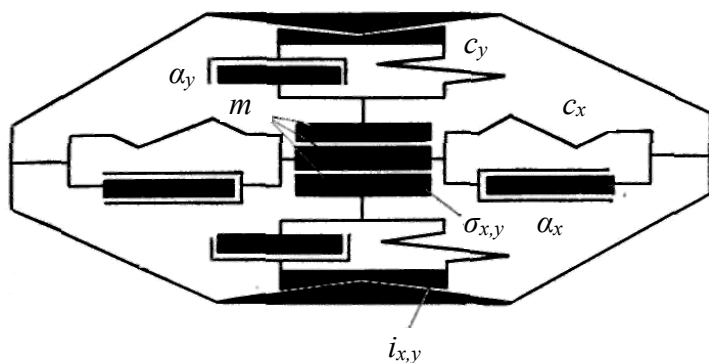


Рисунок 1.15 - Пружно-в'язко-пластично-інерційна феноменологічна модель

вологістю. До прямих методів відноситься ваговий метод, оснований на сушінні проби матеріалу до постійної ваги [127].

Методи вимірювання вологості розглядуваних матеріалів докладно описані в роботі [127] і класифікуються на прямі, при реалізації яких матеріал розділюють на тверду та рідинну фази, та посередні, що передбачають вимірювання фізичних величин або властивостей функціонально зв'язаних із

1.2.2 Статичне пресування вологих дисперсних матеріалів

Найважливіші результати досліджень даних процесів представлені у роботі [34]. Взагалі, пресуванням називається механічна обробка матеріалу шляхом його стискання зовнішніми силами. В результаті стискання порції вологого дисперсного матеріалу з нього виділяється рідинна фаза зі зменшенням порції в об'ємі і масі. Досконалість процесу визначається повнотою видалення рідинної фази, що у свою чергу, залежить від оптимальності параметрів навантаження та технологічних можливостей обладнання для його реалізації [139].

Збільшено у порції оброблюваного матеріалу об'ємом W можна виділити три основні шари [34, 140] (рисунок 1.16): шар твердих частинок об'ємом W_m та висотою H_m , шар рідинної фази з відповідними

параметрами (W_p та H_p), а також газовий шар (W_g , H_g). Таке уявлення про структуру порції є, звичайно, дуже спрощеним, оскільки в дійсності вона включає і перехідні шари, до того ж після установаження зверху на порцію пуансона, без чого процес пресування не може бути розпочатий, газова фаза частково виходить назовні, а частково розподіляється у рідинному та

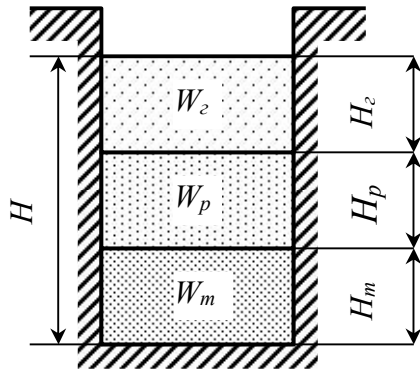


Рисунок 1.16 – Спрощена структурна схема порції вологого дисперсного матеріалу

твердому шарам порції [141]; тверді частинки зближуються настільки, що між ними починають діяти сили молекулярного зчеплення [142]. Пресуванням можна вилучити тільки ту частину рідини, яка пов'язана з твердими частинками механічними та структурними зв'язками. Видалення рідини починається тоді, коли зовнішній вплив стає інтенсивнішим за міцність вказаних зв'язків. Найбільша кількість рідини видаляється на початковій стадії пресування, далі інтенсивність видалення падає та припиняється зовсім [143, 144].

У загальному випадку під час пресування у середовищі оброблюваного матеріалу необхідно створити тиск, що є більшим капілярного тиску p_σ вільної рідини порції, який можна визначити за формулою [145]

$$p_\sigma = \frac{2 \cdot \sigma_{12}}{r}, \quad (1.3)$$

де σ_{12} – коефіцієнт поверхневого натягу між газовою та рідинною фазами; r – радіус капіляру в частинках і між частинками твердої фази.

Значення p_σ може бути достатньо великим і тим більшим, чим меншою є величина r . Наприклад, для капіляру з $r = 10^{-8}$ м $p_\sigma = 15 \cdot 10^6$ Па [146].

У гігроскопічній області сила F_κ , що утримує рідину у капілярах обчислюється за величиною відносної вологості повітря φ_n , яка відповідає рівноважній вологості матеріалу [145]

$$F_\kappa = \frac{R \cdot T_p}{M_m} \varphi_n, \quad (1.4)$$

де R – універсальна газова постійна; T_p , M_m – робоча температура та молекулярна маса матеріалу.

Енергія зв'язку E_κ рідини з твердими частинками матеріалу у гігроскопічній області є, по суті, потенціалом вологоперенесення [145] і може бути знайдена за формулою [147]

$$E_k = -R \cdot T_p \cdot \ln \varphi_n. \quad (1.5)$$

В процесі пресування на окремих ділянках внутрішнього об'єму порції виникає градієнт вологості і під його впливом рідина переміщується від більш вологих ділянок до менш вологих [126].

Розглянемо залежності для визначення тиску на днищі прес-форми, нижній торцевій поверхні пуансона, також розподілення тиску по висоті прес-форми [34, 148] при використанні способу статичного пресування.

Тиск на нижньому торці пуансона відповідає максимальному тиску p_m у пресованому матеріалі, можна визначити як суму двох складових: нейтрального $p_{н.т}$ тиску, значення якого залежить від напору витікання рідини з прес-форми та ефективного тиску $p_{ef.т}$, який сприймається скелетом твердих частинок. Тобто

$$p_m = p_{н.т} + p_{ef.т}. \quad (1.6)$$

В міру ущільнення матеріалу тиск p_m зростає внаслідок звуження каналів між твердими частинками та зростання опору їх стискання в процесі зближення центрів мас. Отже тиск p_m є функцією порозності матеріалу, що характеризується коефіцієнтом ε_m [149].

Тиск $p_{н.т}$ визначається опором, який долає рідина при проходженні по каналах між твердими частинками (тиск $p_{н.ф}$, напір $h_{н.ф}$), а також скрізь отвори у прес-формі, закриті фільтрувальною сіткою (тиск $p_{н.с}$, напір $h_{н.с}$) [34]

$$p_{н.т} = p_{н.ф} + p_{н.с} = (h_{н.ф} + h_{н.с})g \cdot \rho_p, \quad (1.7)$$

де ρ_p – густина рідини, кг/м³.

Швидкість витікання рідини через елементарний поперечний переріз твердих частинок, при ламінарному режимі може бути визначена за законом Дарсі

$$v_p = k_\phi \cdot J \frac{1 + \varepsilon_m}{\varepsilon_m}, \quad (1.8)$$

де $J = \frac{h_p - h_n}{l_k}$ – гідравлічний градієнт – відношення різниці напорів рідини та атмосферного повітря до довжини каналу (очевидно, що h_p буде максимальним у перерізі контакту матеріалу з пуансоном, тоді як величина l_k залежить від розмірів прес-форми); k_ϕ – коефіцієнт фільтрування.

Оскільки витікання рідини з прес-форми відбувається при атмосферному тиску у навколишньому середовищі, то $h_n = 0$. Тоді з рівняння (1.8) [150]

$$h_{н.ф} = h_p = \frac{v_p l_k \varepsilon_m}{k_\phi (1 + \varepsilon_m)}. \quad (1.9)$$

Тоді залежність для визначення нейтрального тиску приймає вигляд [22]

$$p_{н.т} = \left(\frac{v_p l_k \varepsilon_m}{k_\phi (1 + \varepsilon_m)} + h_{н.в} \right) g \cdot \rho_p \cdot \dots \quad \dots(1.10)$$

Рівняння (1.10) дозволяє визначити лише деякі основні робочі параметри процесу пресування, в тому числі нейтральний тиск та швидкість витікання рідини, що витискається з порції оброблюваного матеріалу і є функцією порозності його твердих частинок [151]. А оскільки останній параметр є змінним і зменшується в напрямках від центральних до верхнього і нижнього шарів порції, то й швидкість витікання по висоті прес-форми падає у вказаних напрямках [152]. При цьому залежність між швидкістю витікання рідини та порозністю твердих частинок є нелінійною (див. рівняння (1.8)) [150]. Внаслідок безперервної зміни порозності та фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу в процесі його пресування, коефіцієнт k_ϕ буде неоднаковим в різних перерізах порції по її висоті. Також k_ϕ і градієнт J залежать від температури та вологості оброблюваного матеріалу [153, 154].

1.2.3 Вібраційне навантаження вологих дисперсних матеріалів

Теоретичні основи вібраційного навантаження вологих дисперсних матеріалів в різноманітних процесах харчової промисловості були в основному розроблені І. Ф. Гончаревичем та І. Б. Урьєвим [43, 50, 51]. Зокрема, ними встановлено, що для підвищення ефективності вібраційної механічної обробки – збільшення продуктивності та зниження енергоємності процесу – потрібно в ході його реалізації збільшувати швидкості відриву частинок та прискорення їх переміщень [43]. В результаті матеріал може бути переведений у стан псевдозрідження або віброкипіння. Псевдозрідженням називають зменшення опору деформуванню з порушенням зв'язків між всіма частинками, їх безвідривним переміщенням та деяким зменшенням об'єму шару [155]. Віброкипіння – зниження до мінімуму реологічного опору деформуванню, повне руйнування початкової структури, взаємне переміщення частинок з

повним відривом, досягненням максимальної однорідності розподілення фаз та збільшенням об'єму шару.

Згідно із [43], основними перевагами способу вібраційного навантаження є: по-перше, забезпечення можливості передачі порції оброблюваного матеріалу значної енергії за дуже короткий проміжок часу та при мінімальному зміщенні частинок; по-друге, можливість регулювання в широких межах частоти і амплітуди вібраційного навантаження, що дозволяє здійснювати ефективну обробку як великих об'ємів матеріалу, так і шарів товщиною в декілька мікрометрів.

Як показали дослідження [118], в результаті вібраційного навантаження порції вологого дисперсного матеріалу, тверді частинки, що мають найбільші густину та розміри переміщуються у верхні шари. Тим же автором встановлено, що підвищення частоти або амплітуди вібраційного навантаження забезпечує збільшення ступеню ущільнення твердих частинок лише до певної межі і при подальшому нарощуванні вказаних параметрів спостерігається розпушення порції матеріалу. Для запобігання останньому, при збільшенні частоти імпульсів вібраційного навантаження потрібно забезпечувати адекватне зменшення їх амплітуди і навпаки [53].

Процес вібраційного ущільнення твердих частинок в часі відбувається нерівномірно з убутною продуктивністю, що пояснюється збільшенням площі контакту твердих частинок в одиниці об'єму порції [63].

Зі збільшенням розмірів твердих частинок оброблюваного матеріалу максимальний можливий ступінь його ущільнення зменшується, що змушує для збереження ефективності процесу збільшувати прискорення виконавчого елемента обладнання [54, 62].

Зі збільшенням вологості оброблюваного матеріалу для забезпечення максимального ступеню ущільнення твердих частинок потрібно також підвищувати їх прискорення. В більшості випадків збільшення останнього до величини прискорення вільного падіння не дозволяє досягти належного ущільнення, оскільки при цьому матеріал переходить лише у стан псевдозрідження. В той же час, нарощування прискорень до значень $>g$ призводить до переходу порції у стан віброкипіння з розпушенням її нижніх шарів, чому може запобігти використання статичного притискання пуансона до порції матеріалу [43].

Також зі зменшенням товщини шару оброблюваного матеріалу, величина прискорень твердих частинок може бути зменшена аж до величини g без зниження ступеню їх ущільнення [53].

Демпфірування в розглядуваних дисперсних системах являє собою досить складне явище і може виникати в результаті взаємного сухого або гідродинамічного тертя твердих частинок, опору їх руху у рідинній або газовій фазах, проходження останніх через пори твердої фази, деформації недостатньо пружних фаз, наявності різних сил зчеплення тощо. Наявність

сил демпфірування обумовлює нелінійні ефекти в системі, що піддається віброобробці і надзвичайно ускладнює її дослідження. На практиці використовують різні методи апроксимації реальних видів демпфірування в'язким. Розроблено методи, що дозволяють складні нелінійні системи зводити до простіших лінійних. Зокрема, використовуючи метод енергетичного балансу, який полягає в тому, що розсіяна за цикл енергія, обумовлена реальними опорами, прирівнюється до втрат енергії від в'язких опорів, складні види опорів можна звести з достатньої для практичних цілей точністю до в'язких і пружних опорів. Отже, будь-які багатозначні дисперсні системи, а також закономірності їх поведінки під впливом вібрації можуть бути змодельовані за допомогою стандартних пружно-в'язко-пластично-інерційних феноменологічних моделей та методів феноменологічної реології [43].

У рідинній і газовій високодисперсних системах внаслідок великої активної міжфазної поверхні, зростає вільна поверхнева енергія на межі розділу фаз, а також роль молекулярних сил зчеплення між частинками. В результаті виникають окремі агрегати з частинок і просторові структури. У грубодисперсних системах, в яких між частинками немає зчеплення, а діють лише сили тертя, просторові структури не виникають і тому масообмінні процеси протікають, як правило, при менш інтенсивних вібраційних впливах [52, 62].

Сили тяжіння і сили інерції, що виникають у середовищі матеріалу додаються, в результаті він опиняється під впливом періодичного пульсуючого навантаження, що передається хвилями від нижніх до верхніх шарів. В процесі даної передачі імпульси навантаження послаблюються, при цьому ступінь їх затухання, залежить від властивостей матеріалу, а також інтенсивності та характеру вібрацій [53]. До цього ж, імпульси передаються зі зсувом за фазою, величина якого для дрібнодисперсних матеріалів з поганою газопроникністю може сягати 180° [43]. Між виконавчим елементом вібраційного обладнання та нижнім шаром дрібнодисперсного оброблюваного матеріалу, що до нього прилягає, під час навантаження може виникати розрідження.

Згадані вище феноменологічні моделі повинні відображати й затухання коливань твердих частинок оброблюваного матеріалу під час його вібраційного навантаження, що обумовлене гістерезисними втратами [156]. При цьому дані затухання можуть спостерігатися й у середовищах з малими гістерезисними втратами в тому випадку, якщо збудження відбувається на частотах більш низьких, ніж нижня частота власних коливань середовища. У цьому випадку в середовищі поширюються експонентні хвилі, амплітуда коливань яких зменшується за експонентою в міру віддалення від джерела коливань [157]. Тому для забезпечення більш глибокої віброобробки дисперсних систем необхідно підвищувати частоти збурювання до значень, що перевищують нижню частоту власних

коливань середовища [158]. Таким чином, при визначенні енерговитрат необхідно використовувати таку реологічну модель, яка б враховувала змінність амплітуди коливань середовища, а також те, що його частина взагалі може не брати участь у коливаннях [159].

Тоді рівняння руху дисперсної системи, що піддається вібраціям в напрямку осі x за законом x' і в напрямку осі y за законом y' мають вигляд [43]

$$\begin{aligned} q_y m_y \ddot{y} &= -q_y m_y \dot{y} - c_y y - \alpha_y \dot{x} - \alpha'_y (\dot{x} + \dot{y}) - (1 - q_x) m_x g - \text{sign}(\dot{x}) \mu_x (1 - q_x) m_x g; \\ q_x m_x \ddot{x} &= -q_x m_x \dot{x} - c_x x - \alpha_x \dot{y} - \alpha'_x (\dot{x} + \dot{y}) - (1 - q_x) m_x g - \text{sign}(\dot{x}) \mu_x (1 - q_x) m_x g, \end{aligned} \quad (1.11)$$

де m_x, m_y – загальна маса порції оброблюваного матеріалу; q_x, q_y – коефіцієнти, що враховують, яка частина загальної маси порції бере участь у коливаннях; μ_x – коефіцієнт сухого тертя в напрямку осі x .

Тоді закон руху дисперсної системи, що знаходиться під впливом двокomпонентних гармонійних коливань з амплітудами A_x, A_y , коловою частотою ω та зсувом за фазою γ між складовими рухами, можна представити у вигляді [43]

$$\begin{aligned} x' &= A_x \sin \omega \cdot t; \dot{x} = A_x \omega \cdot \cos \omega \cdot t; \\ y' &= A_y \sin(\omega \cdot t + \gamma); \dot{y} = A_y \omega \cdot \cos(\omega \cdot t + \gamma). \end{aligned} \quad (1.12)$$

Підставляючи (1.11) у (1.12), здійснюючи лінеаризацію та перетворення одержаних рівнянь, одержують залежності для визначення оптимальних параметрів вібраційного навантаження порції оброблюваного матеріалу, зокрема для переведення його у стан віброкипіння [43, 160].

1.3 Резонансно-структурна теорія процесів віброударного інерційного пресування сухих непластичних порошків

Дана теорія, розроблена Р. Д. Ісковичем-Лотоцьким [64, 119], пояснює механізм процесів віброударного навантаження непластичних порошків на інерційних вібропрес-молотах з гідроімпульсним приводом (ІВПМ) [65] (див. рисунок 1.8), розкриває їх ефективність та дозволяє визначати оптимальні параметри навантаження матеріалу, виходячи з його фізико-механічних характеристик.

На рисунку 1.17 представлена динамічна модель даного навантаження [64], на якій позначені: m_1, m_2 – маси нижнього та верхнього виконавчих елементів ІВПМ (m_1 включає масу заготовки); x_1, x_2 – переміщення виконавчих елементів; $R_{01} \text{sign} x'_1 = R_{1i}, R_{02} \text{sign} x'_2 = R_{2i}$ – сили

сухого тертя в напрямних виконавчих елементах; α_1, α_2 – коефіцієнти в'язкого демпфірування при переміщенні виконавчих елементів; c_y –

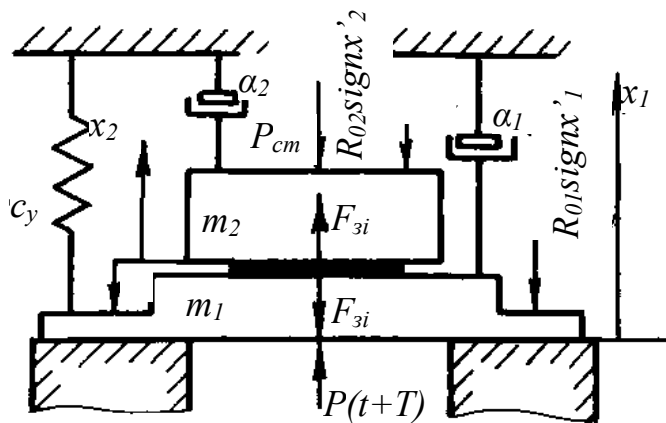


Рисунок 1.17 – Динамічна модель віброударного інерційного навантаження рівнянь [64]

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_y x_{1i} + R_{1i} + F_{zi} = P(t); \quad m_2 \ddot{x}_2 + R_{2i} + P_{cm} = F_{zi}, \quad (1.13)$$

що дозволяють визначати переміщення, швидкості та прискорення виконавчих елементів і заготовки, а також створювані на останній зусилля F_{zi} .

На рисунку 1.18. представлена принципова система зв'язаної структури заготовки в контейнері прес-форми – твердої частинки порошкового матеріалу масою m_i , що взаємодіє з нерухомими частинками

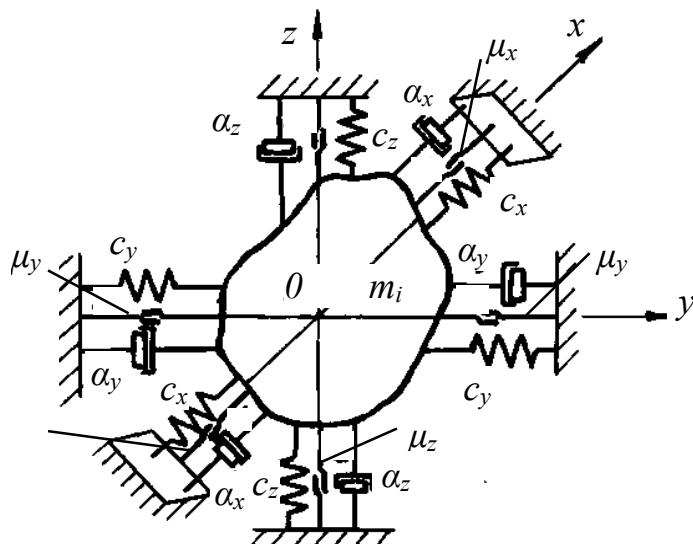


Рисунок 1.18 - Принципова система зв'язаної структури заготовки в контейнері прес-форми

нижнього виконавчого елемента; P_{cm} – зусилля статичного притискання пуансона до заготовки; F_{zi} – зусилля на заготовці; $P(t + T)$ – періодична зовнішня сила.

Математична модель процесу навантаження заготовки впродовж i -го циклу $T \cdot i \leq t \leq T(i + 1)$ прикладення сили $P(t+T \cdot i)$, за умови $F_{zi} > 0$, може бути представлена у вигляді диференціальних

основи, які її оточують. Згідно із експериментально доведеною резонансно-структурною теорією [64], в процесі віброударного пресування при інерційному навантаженні пластичне деформування, або формоутворення за рахунок зростання залишкових деформацій в заготовці відбувається дискретно, а їх величина зменшується зі збільшенням поточного значення густини заготовки для кожного наступного

циклу навантаження.

Висока ефективність способу віброударного інерційного пресування при формоутворенні заготовок з непластичних порошкових матеріалів обумовлена наявністю в кожному імпульсі зовнішніх сил, що передаються від нижнього виконавчого елемента ІВПМ частинкам заготовки складових у вигляді пакету n моногармонійних синусоїдальних хвиль. При цьому діапазон кутових частот пакету $\Delta\omega = \omega_n - \omega_1$ є настільки широким, що до нього гарантовано потрапляють власні кутові частоти частинок матеріалу заготовки, контактуючих з даним виконавчим елементом. Останнє обумовлює їх коливання в області резонансу, а отже й взаємне прослизання та повертання, з більш щільним укладанням та руйнуванням структурних утворень типу «арок» і «містків». Дані коливання передаються частинкам верхніх шарів заготовки, таким чином, у середовищі матеріалу 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 та часу забезпечується рівномірне ущільнення оброблюваного матеріалу по всьому об'єму [64]. Можливі переміщення хвиль напружень в заготовці визначаються граничними умовами, величинами фазових швидкостей $v_{\phi i}$ та імпульсів зовнішніх сил.

Вільні коливання частинки m_i по осях нормальних координат, відповідних головним осям x_i, y_i, z_i , описуються рівняннями [64]

$$m_i \ddot{z}_i + c_{z_i} \cdot z_i = 0; \quad m_i \ddot{y}_i + c_{y_i} \cdot y_i = 0; \quad m_i \ddot{x}_i + c_{x_i} \cdot x_i = 0. \quad (1.14)$$

Фазова швидкість розповсюдження хвилі вздовж осі циліндричної заготовки

$$v_{\phi i} = \sqrt{\frac{K_{z_i}}{\rho_{z_i}}}, \quad (1.15)$$

де ρ_{z_i} – густина матеріалу заготовки у продовж i -го циклу віброударного навантаження; K_{z_i} – динамічний модуль пружності матеріалу заготовки.

Власну частоту коливань частинок заготовки можна розрахувати як [161]

$$\omega_{z_i} = \frac{S_i \pi}{h_{z_i}} \sqrt{\frac{K_{z_i}}{\rho_{z_i}}}, \quad (1.16)$$

де S_i – площа поперечного перерізу виділеного об'єму заготовки; h_{z_i} – висота заготовки у продовж i -го циклу навантаження.

Різниця $\Delta\omega = \omega_{1k} - \omega_{10}$ основних частот коливань заготовки у

початковий та кінцевий моменти пресування, що відповідає ширині пакету, або частотній смузі моногармонійних n хвиль в складному імпульсі зовнішнього силового впливу

$$\Delta\omega = \frac{\pi}{h_{зк}} \sqrt{\frac{K_{зк}}{\rho_{зк}}} - \frac{\pi}{h_{з0}} \sqrt{\frac{K_{з0}}{\rho_{з0}}} = \frac{\pi}{h_{з0}h_{зк}} (h_{з0}v_{\phiк} - h_{зк}v_{\phi0}), \quad (1.17)$$

де $\rho_{з0}, \rho_{зк}; h_{з0}, h_{зк}; K_{з0}, K_{зк}; v_{\phi0}, v_{\phiк}$ – відповідно густина, висота та динамічний модуль пружності заготовки, а також фазові швидкості у початковий та кінцевий моменти пресування.

Тоді тривалість одиночного імпульсу τ_0 , гармонійні частотні компоненти якого лежать в інтервалі $\Delta\omega$ обчислюється як [64, 162]

$$\tau_0 = \frac{2\pi}{\Delta\omega} = \frac{2\pi}{\omega_n - \omega_l} = \frac{2h_{з0} \cdot h_{зк}}{h_{з0} \cdot v_{\phiк} - h_{зк}v_{\phi0}}. \quad (1.18)$$

Амплітудне значення складного імпульсу напружень в заготовці σ_{max} , що виникає в результаті проходження через неї пакету n гармонійних хвиль напружень з амплітудними значеннями σ_i визначаємо як

$$\sigma_{max} = \sum_{i=1}^n \sigma_i = n \cdot p_{num} = \frac{F_{зmax}}{S_з}, \quad (1.19)$$

де $p_{num} = \frac{P_{\Sigma}}{S_з} = \frac{P_{cm} + m_2g}{S_з}$ - питоме статичне зусилля на заготовці з

боку пуансона з інерційним вантажем, що забезпечує запобігання руйнуванню її верхніх шарів [163]. Згідно із рекомендаціями [163] значення p_{num} вибираються залежно від вмісту у порошковому матеріалі зв'язувальних речовин в межах 0,1...1,0 МПа;

$F_{зmax}$ – максимальне зусилля на заготовці з боку пуансона;

$S_з$ – площа поперечного перерізу заготовки.

Тоді розрахункове робоче зусилля P_{max} на столі ІВПМ

$$P_{max} = \frac{F_{зmax}}{m_2} m_{\Sigma} = n \cdot p_{num} \cdot S_з \cdot \left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right). \quad (1.20)$$

У роботах [64] експериментально встановлено, що розрахункове число компонентів пакету хвиль в складному імпульсі залежить від середньостатистичного лінійного розміру a частинок матеріалу і його можна визначати як

$$n_p = \frac{h_{z0} - h_{zk}}{a}. \quad (1.21)$$

Згідно з теоремою про ширину смуги [162], знайдене значення тривалості складного імпульсу τ_0 (1.18) визначає ширину його центральної частини, в якій імпульс забезпечує максимальну амплітуду. При цьому шукане значення величини імпульсу зовнішніх сил можна приблизно оцінювати з врахуванням (1.18, 1.20) як

$$K_i \approx P_{max} \cdot \tau_0 = n \cdot p_{num} \cdot S_3 \left(1 + \frac{m_1}{m_2} \right) \frac{2h_{z0} \cdot h_{zk}}{h_{z0}v_{\phi k} - h_{zk}v_{\phi 0}}. \quad (1.22)$$

За відомим значенням імпульсу K_i , потрібним для реалізації режиму інерційного навантаження певної заготовки з порошкового матеріалу під час віброударного пресування, можна оцінити величину енергії, яка необхідна для здійснення робочого ходу обладнання [64].

2 ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОПОНОВАНОГО СПОСОБУ ВІБРОУДАРНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ ВОЛОГИХ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЙОГО ЗДІЙСНЕННЯ

2.1 Створення експериментального гідроімпульсного стенду для віброударного зневоднення

Для експериментального доведення високої ефективності пропонуваного способу віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів у порівнянні із відомими способами застосовувався експериментальний гідроімпульсний стенд, створений нами на базі інерційного вібропрес-молота з ГП моделі ІВПМ-16 [5, 64]. На рисунку 2.1 представлена принципова гідрокінематична схема даного стенду.

Стенд містить станину 2, що складається з верхньої, середньої та нижньої поперечин, з'єднаних колонами 19 і базується на віброопорах 18. На верхній поперечині змонтований допоміжний гідроциліндр 1, шток якого зв'язаний із рухомою траверсою 4, що навантажена інерційними вантажами 3. На нижній поверхні траверси 4, на кронштейнах, у підшипниках ковзання установлений верхній віброударний валок 5. На середній поперечині станини закріплений основний гідроциліндр 14 ГП, плунжер якого зв'язаний з вібростолом 11. На вібростолі, на кронштейнах, у підшипниках ковзання установлений ще один нижній віброударний валок 8. По периметру вібростолу 11 закріплений кутовий жолоб 10 з рукавом 12 для збирання видаленої з матеріалів, зневоднюються рідини. Рукав 12 опущений у бак 15.

На розрізі А - А рисунку 2.1 представлений вид збоку технологічного оснащення стенду, яке більш докладно показане на рисунку 2.2 і описане у даному підрозділі нижче.

Гідравлічний привод допоміжного гідроциліндра 1 стенду (див. рисунок 2.1) складається з насоса 25 з фільтром 26 у нагнітальній гідролінії, переливного клапана 27 і чотирилінійного гідророзподільника 24 з ручним керуванням.

ГП стенду включає насос 21 з фільтром у всмоктувальній гідролінії, запобіжний клапан 28, регулятор витрат 9, одноцикловий гідроаккумулятор 22, двопозиційний дволінійний гідророзподільник 20 з ручним керуванням та основний елемент керування та регулювання привода – двопозиційний двокаскадний вібробуджувач 23, приєднаний за схемою "на вході" [64, 65]. У нагнітальну гідролінію також включений пружинний манометр, який на час роботи ГП від'єднується за допомогою крану.

На рисунку 2.2 вузол технологічного оснащення стенду показаний в осьовому перерізі. Валки 5, 8 стенду (див. рисунок 2.1) складаються з корпусу 25 (див. рисунок 2.2) і приварених до нього цапф 35, 36.

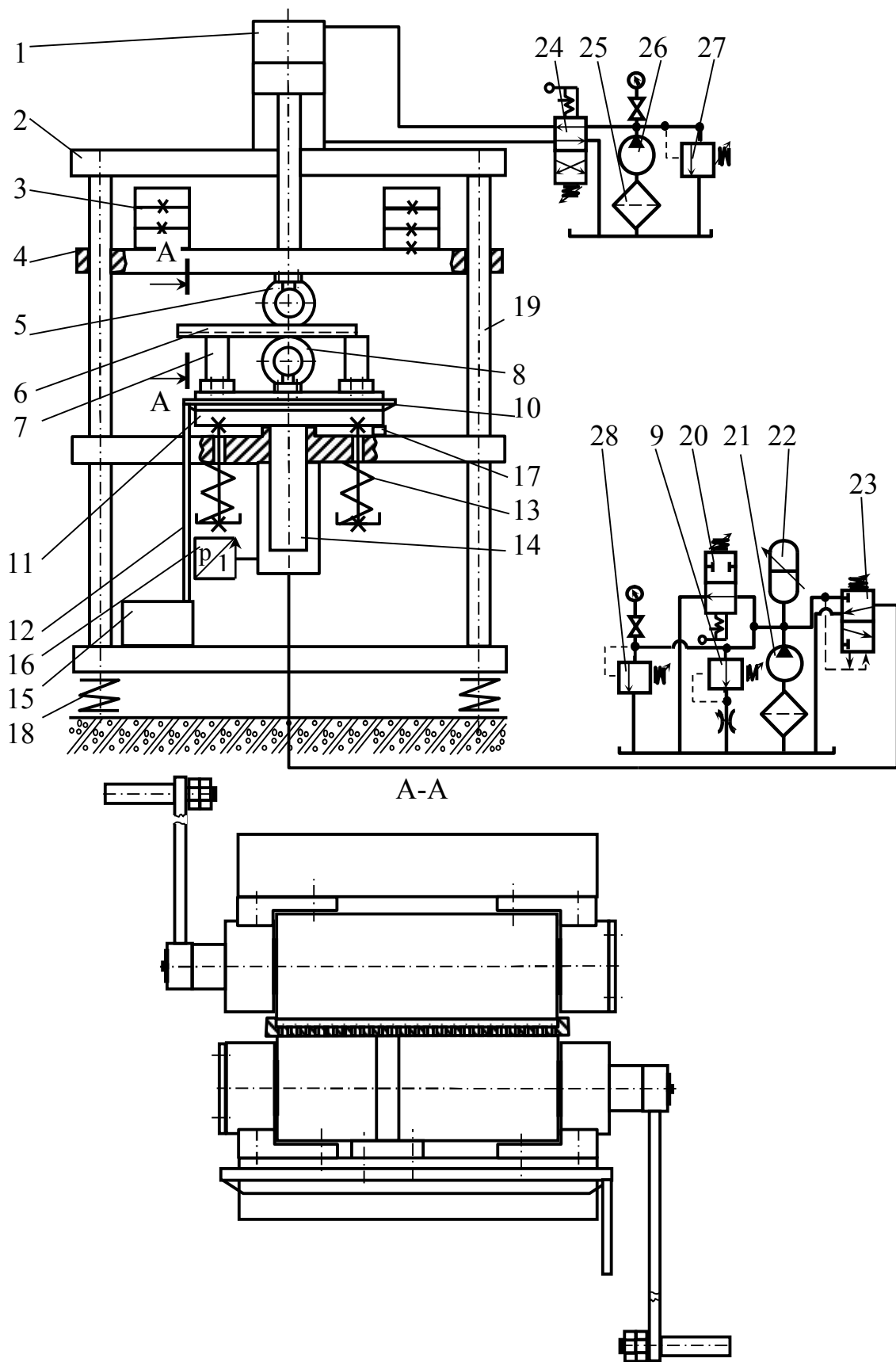


Рисунок 2.1 – Принципова гідро-кінематична схема експериментального гідроімпульсного стенду для віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів на базі вібропреса ІВПМ-16

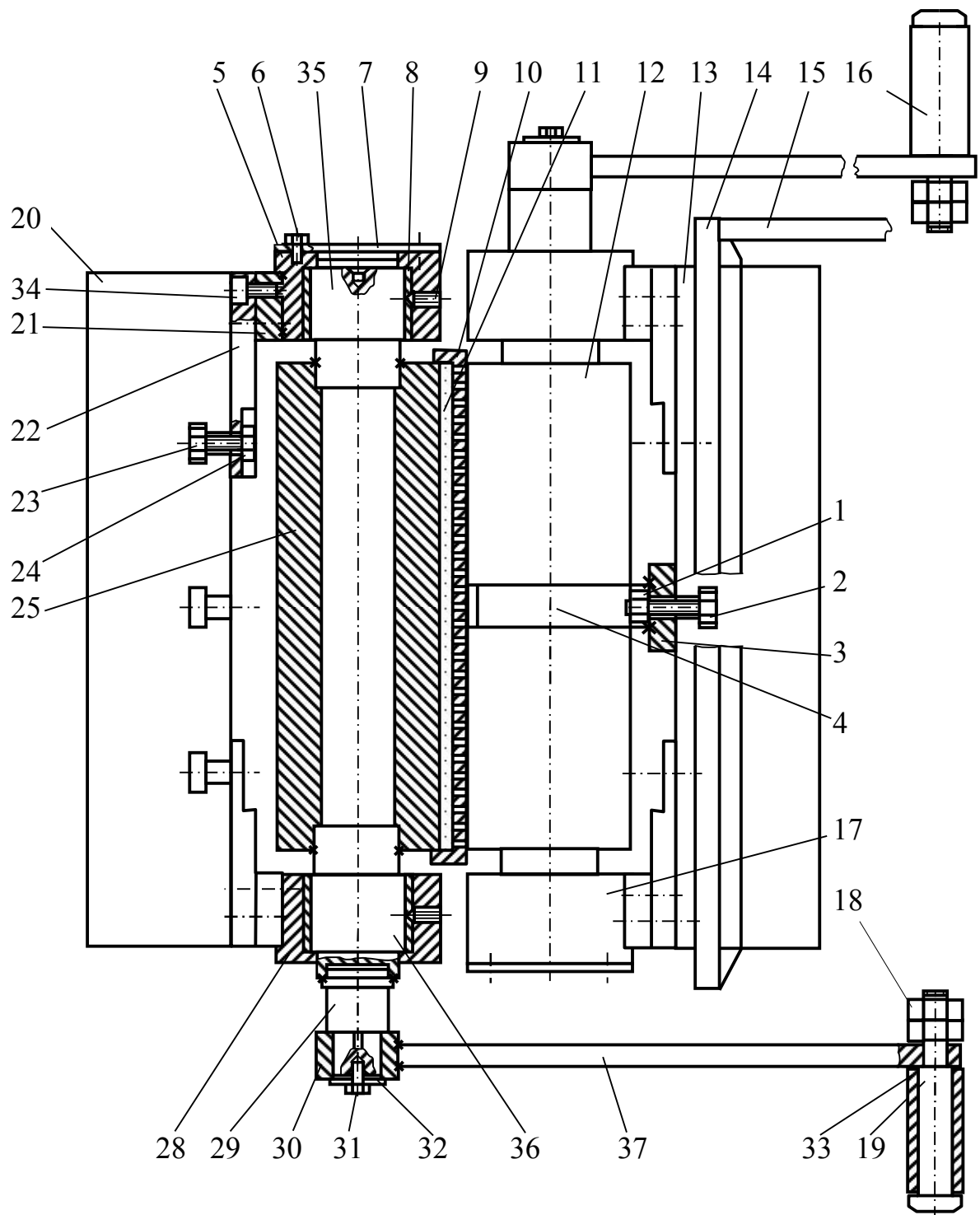


Рисунок 2.2 – Конструктивна схема технологічного оснащення експериментального гідроімпульсного стенду для віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів

До втулок 5, 28 приварені опорні пластини 21, які, в свою чергу, з'єднуються болтами 34 з основами 22. Основи валка 25 прикріплені до рухомої траверси стенду 20, основи валка 12 – до вібростолу 13. Кріплення здійснюється за допомогою болтів 23, гайок 24 та пружинних шайб (останні на схемі не показані); головки болтів 23 закладаються у Т-подібні пази траверси і вібростолу. Між валками знаходиться піддон 10 з порцією матеріалів 11, що зневоднюються, рівномірно розподілених шаром товщиною 2 – 5 мм по верхній поверхні піддону. Останній являє собою сталеву пластину С-подібного поперечного перерізу з великим числом наскрізних отворів діаметром 3 мм, обтягнену щільною тканиною, що не пропускає тверді частинки оброблюваного матеріалу. Валки приводяться в обертання вручну за допомогою рукояток 16, 33 (можливий також привод валків від планетарного мотор-редуктора через зубчасті колеса та пружні муфти з тороподібними оболонками [164], див. рисунок 7.2), але ручний привод простіший та дешевший, крім цього, дозволяє здійснювати безступінчасте регулювання частоти обертання валків, а також їх реверс, без використання електродвигуна постійного струму та складної комутуючої електроапаратури, тому для запланованих експериментальних досліджень він є найбільш придатним. Рукоятки 16, 33 повертаються на осях 19. Кожна вісь вільно входить в отвір важеля 37; на її різьбовий кінець нагвинчені законтрені гайки 18. Важіль 37 приварений до втулки 30, насадженої на кінець вала 29 квадратного поперечного перерізу. В осьовому напрямку втулка 30 зафіксована на валу 29 за допомогою шайби 32 та болта 31. Вал 29 приварений до цапфи 36.

Стенд працює таким чином. При відключеному ГПП вмикається насос 25 (див. рисунок 2.1) допоміжного привода, гідророзподільник 24 перемикається у нижню за схемою позицію. В результаті робоча рідина надходить під тиском у штокову порожнину гідроциліндра 1; поршнева порожнина останнього сполучається через гідророзподільник 24 зі зливом. Поршень гідроциліндра 1 і разом з ним траверса 4 з інерційними вантажами 3 піднімаються вгору на 5 – 10 мм. Між валками 5, 8 вставляється піддон 6 з порцією матеріалів, що будуть зневоднюватись, рівномірно розподілених по поверхні піддону. Далі гідророзподільник 24 перемикається у верхню за схемою позицією і робоча рідина від насоса 25 починає надходити у поршкову порожнину гідроциліндра 1 (штокова порожнина сполучена зі зливом). Поршень гідроциліндра 1, а разом з ним і траверса 4 з інерційними вантажами 3 та валком 5 опускаються вниз до притискання останнього до порції матеріалу, що зневоднюється, при цьому зусилля притискання можна регулювати за допомогою переливного клапана 27. При відкритому на злив гідророзподільнику 20 (нижня позиція за схемою) вмикається насос 21 ГПП. При перемиканні гідророзподільника 20 у верхню за схемою позицію перетікання через нього подачі насоса у бак припиняється і тиск робочої рідини у нагнітальній гідролінії ГПП починає збільшуватись. На даному I-му етапі спрацьовування ГПП

вібробуджувач знаходиться у верхній за схемою позиції і робоча рідина з порожнини гідроциліндра 14 йде через вібробуджувач у бак. Тиск в ній малий і вібростіл 11 притиснений пружинами 13 до запліччя поперечини станини 2. Тим часом у порожнині гідроаккумулятора 22 тиск збільшується, у зв'язку із чим він накопичує потенціальну енергію. У момент досягнення у нагнітальній гідролінії заданого тиску p_1 відкриття вібробуджувача (величину p_1 можна змінювати), останній відкривається (нижня позиція за схемою) і робоча рідина від насоса 21 та з порожнини гідроаккумулятора йде у порожнину гідроциліндра 14. Тиск в ній різко збільшується до величини незначно меншої p_1 (з врахуванням втрат на тертя за довжиною з'єднувальних гідроліній та у місцевих опорах), таким чином, плунжер гідроциліндра і разом з ним вібростіл 11, валки 8, 5 із затисненим між ними піддоном 6 з порцією матеріалу, рухома траверса 4 з інерційними вантажами 3, шток і поршень гідроциліндра 1 швидко зміщуються вгору. Під час робочого ходу плунжера з вібростолом стискаються пружини 13, при цьому тиск у нагнітальній гідролінії ГП падає. Коли він досягає величини p_2 - закриття вібробуджувача – останній знов перемикається у верхню за схемою позицію, з'єднуючи порожнину гідроциліндра 14 зі зливом; починається II-й етап спрацьовування ГП. Тиск у порожнині гідроциліндра ГП падає до зливного, в результаті плунжер з вібростолом, валками, піддоном, траверсою, інерційними масами, штоком і поршнем допоміжного гідроциліндра під дією сил власного тяжіння, а також сили пружності стиснених пружин опускаються вниз до удару вібростолу об запліччя поперечини станини. Одночасно тиск у нагнітальній гідролінії ГП збільшується до p_1 , після досягнення якого цикл його спрацьовування знов повторюється. Під час кожного такого циклу порція матеріалу між валками, що зневоднюється піддається віброударному інерційному та статичному навантаженню відносно вертикальної осі [64], що забезпечує достатньо швидке та повне видалення з неї рідини. Остання проходить через шар тканини натягненої на піддон 6, що затримує тверді частинки матеріалу і далі стікає через отвори піддону у кутовий жолоб 10, після чого по рукаву 12 відводиться у бак 15. Для зневоднення всього об'єму порції матеріалу вручну повертаються рукоятки 16, 33 (див. рисунок 2.2), від яких повільне обертання передається на валки 25, 12 (останні мають обертатись у протилежні сторони).

Таким чином, піддон 10 з порцією матеріалу 11 почине повільно зміщуватись у горизонтальній площині, прокатуючись між валками і підтримуючись кронштейном 4. Після прокатування всієї порції матеріалу змінюють напрямок обертання валків, в результаті чого піддон переміщується у протилежному напрямку і кожна ділянка порції матеріалу піддається повторному віброударному інерційному та статичному навантаженню. Тим самим імітується прокатування порції вологого дисперсного матеріалу між кількома парами валків, що може бути

реалізоване на промисловій установці для потокового віброударного зневоднення (див. рисунок 7.3), яка забезпечує вищу продуктивність процесу, а головне – нижчу кінцеву вологість матеріалу.

На рисунку 2.3 представлені фотографії експериментального гідроімпульсного стану для віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів, а також його технологічного оснащення, виготовленого за схемами, показаними на рисунках 2.1, 2.2. Основні конструктивні параметри і технічна характеристика стану [64] наведені у таблиці 2.1.

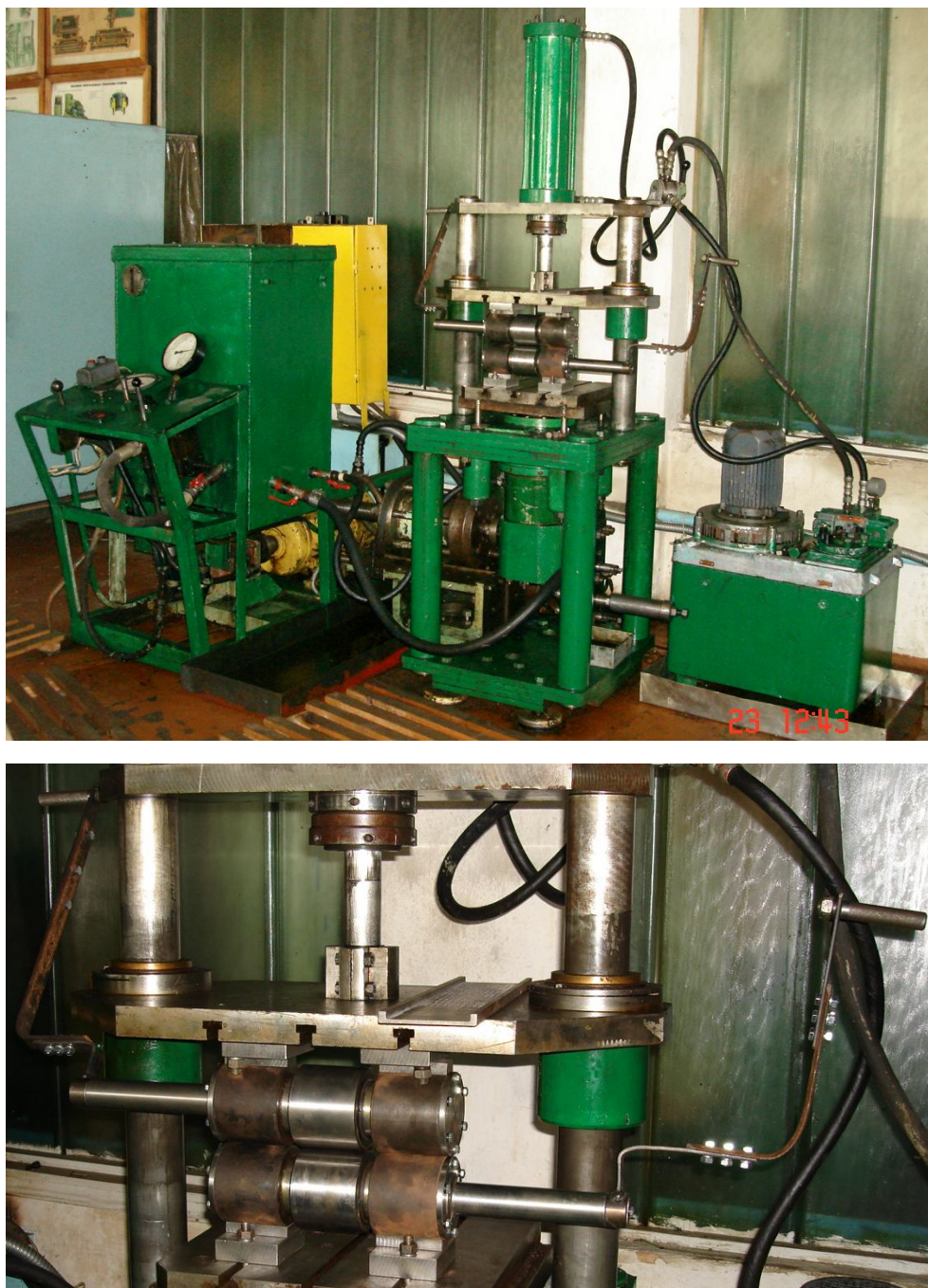


Рисунок 2.3 – Фотографії експериментального гідроімпульсного стану для віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів

Таблиця 2.1 – Основні конструктивні параметри і технічна характеристика експериментального гідроімпульсного стенда для віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів

Найменування параметра і його позначення	Одиниця виміру	Чисельна величина параметра
Площа плунжера гідроциліндра ГПП S_2	м ²	$1,65 \cdot 10^{-2}$
Площа поршня допоміжного гідроциліндра $S_{д.2}$	м ²	$7,85 \cdot 10^{-3}$
Жорсткість пружин повернення вібростолу (сумарна) c_v	Н / м	$2,4 \cdot 10^6$
Діапазон зміни робочого об'єму гідроаккумулятора W_a	м ³	$0 \dots 0,93 \times 10^{-3}$
Маса m_I нижнього виконавчого елемента, що включає маси плунжера гідроциліндра ГПП, вібростолу, нижнього валка і піддону	кг	120
Маса m_{II} верхнього виконавчого елемента, що включає маси траверси, інерційних вантажів та верхнього валка	кг	80...300
Маса станини m_c	кг	2100
Подача насоса ГПП $Q_{н1}$	м ³ /с	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Максимальний робочий тиск у гідросистемі ГПП p_{max}	МПа	14
Максимальний робочий тиск у гідросистемі допоміжного гідропривода $p_{н.max}$	МПа	6,3
Максимальне зусилля, створюване ГПП $P_{г.max}$	Н	$23 \cdot 10^4$
Максимальне зусилля, створюване допоміжним гідроприводом $P_{д.г.max}$	Н	$5 \cdot 10^4$
Потужність електродвигуна ГПП N_{e1}	кВт	18,5
Потужність електродвигуна допоміжного привода N_{e2}	кВт	3,3

2.2 Визначення параметрів ефективності процесів віброударного зневоднення

2.2.1 Розробка програми експериментів

Для експериментального визначення ефективності способу віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів на створеному гідроімпульсному стенді (див. рисунки 2.1, 2.2) потрібно [5, 165]:

- визначити основні параметри навантаження матеріалу під час його віброударного зневоднення, від яких найбільше залежать параметри ефективності процесу – продуктивність $P_{з.p}$ за видаленою з матеріалу

рідиною, енергоємність ϵ_3 зневоднення та кінцева вологість U_k концентрату;

- установити параметри регулювання гідроімпульсного стенду, при збільшенні та зменшенні яких забезпечується ефективна зміна параметрів навантаження досліджуваних процесів [64];

- вибрати контрольно-вимірювальну апаратуру для експериментального визначення параметрів навантаження та ефективності процесів віброударного зневоднення;

- одержати експериментальні залежності параметрів ефективності від кожного з параметрів навантаження і на їх основі визначити оптимальні режими процесів віброударного зневоднення на гідроімпульсному стенді;

- установити значення параметрів ефективності при оптимальних режимах реалізації розглядуваних процесів на експериментальному гідроімпульсному стенді.

2.2.2 Визначення параметрів навантаження та регулювання

В результаті проведених раніше теоретичних досліджень процесів віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів [166, 167], а також теоретичних та експериментальних досліджень процесів віброударного інерційного пресування заготовок виробів з металевих та неметалевих порошкових матеріалів на ІВПМ [64] – базовому обладнанні експериментального стенду (див. рисунок 2.1), установлено, що основними параметрами навантаження під час віброударного зневоднення, які визначають його ефективність є амплітуда z_{1a} та частота ν коливань вібростолу 11, максимальний тиск $p_{z.max}$ у порожнині гідроциліндра 12 ГП, та швидкість ν_n переміщення піддону 6 з матеріалом (див. також підрозділ 5.3).

Ефективне (просте, точне, безступінчасте і в достатньо широких межах) збільшення або зменшення z_{1a} , ν та $p_{z.max}$, можна забезпечити, змінюючи такі параметри регулювання [64] як: площа прохідного перерізу $S_{p.в}$ регулятора витрат 9, робочий об'єм W_a гідроакумулятора 22, тиск відкриття p_1 вібробуджувача 23, величина попереднього стискання z_{0y} пружин 13, маса $m_{i.в}$ інерційних вантажів 3 та зусилля P_{cm} статичного притискання, створюваного гідроциліндром 1 [165]. Однак у проведених експериментах зміна вказаних параметрів навантаження здійснювалась в основному шляхом регулювання $S_{p.в}$ та p_1 . Швидкість ν_n визначається частотою $n_в$ обертання валків 5, 8, та їх діаметром. Частота $n_в$, в свою чергу відповідає частоті обертання приводних рукояток валків.

2.2.3 Вибір контрольно-вимірювальної апаратури

Значення амплітуди z_{1a} та частоти ν коливань вібростолу 11 експериментального гідроімпульсного стенду (див. рисунок 2.1) визначались за допомогою тензометричного датчика переміщень 17 моделі

TURCK Ni8-M18-LiU; тиск $p_{z,max}$ у порожнині гідроциліндра 14 ГП реєструвався тензометричним датчиком тиску 16 моделі ADZ-SML-10.0. Крім цього, використовувались АЦП моделі Е14-140, комп'ютер Pentium III та стандартне програмне забезпечення для АЦП – програмний пакет LGraph2.

Датчик переміщень був закріплений на станині 2 базового вібропреса таким чином, щоб його виконавчий елемент у вихідному положенні дотикався з певним натягом до нижньої поверхні вібростолу 11. Під час коливань останнього, при здійсненні процесів віброударного зневоднення, сигнали від датчика подавались на АЦП, перетворювались, в результаті на екрані монітора комп'ютера одержували осцилограму переміщення вібростолу в часі. З осцилограми за максимальними значеннями відхилень столу та періодом його коливань, установлювали z_{Ia} та ν .

Докладне обґрунтування вибору апаратури використовуваного контрольно-вимірального комплексу, його блок-схема, наведені у розділі 6.3; фотографії та характеристики датчиків і АЦП, тарувальні графіки датчиків та схеми їх підключення представлені у роботі [5]. У розділі 6.4 наведені приклади одержаних під час експериментальних досліджень осцилограм зміни z_I та p_z .

2.2.4 Визначення параметрів ефективності процесів віброударного зневоднення

Продуктивність $\Pi_{z,p}$ [кг/хв] віброударного зневоднення розраховувалась як відношення маси рідини $m_{p,в}$, видаленої з порції матеріалу, що викладалась на піддон 6 (див. рисунок 2.1) шаром товщиною 5 мм, до тривалості ΣT_3 процесу зневоднення порції [168]

$$\Pi_{z,p} = \frac{m_{p,в}}{\Sigma T_3}. \quad (2.1)$$

Маса $m_{p,в}$, в свою чергу визначалась як різниця початкової $m_{м.н}$ та кінцевої $m_{м.к}$ маси порції матеріалу – до та після її віброударного зневоднення [168]

$$m_{p,в} = m_{м.н} - m_{м.к}. \quad (2.2)$$

Як матеріал використовувалися: кавовий шлам, спиртова барда та буряковий жом – всі вологістю $U_n = 75\%$. Частина досліджень проводились в рамках госпдоговірної НДР №1926, № держ. реєстрації 0110U004207, на замовлення спільного підприємства «Галка Лтд». Попереднє зневоднення матеріалів здійснювалось способом вільного стікання на металевих ситах

[22]. Маса $m_{м.п}$ і $m_{м.к}$ визначалась за допомогою електронної ваги з точністю до 1 г. Час ΣT_3 контролювався за секундоміром.

Енергоємність ϵ_3 [кВт·год/т] зневоднення може бути розрахована як відношення енерговитрат ΣE_3 на здійснення процесу до маси $m_{р.в}$. В свою чергу ΣE_3 обчислювались як добуток сумарної установленної потужності $N_{e\Sigma}$ електродвигунів експериментального гідроімпульсного стенду (див. рисунок 2.1 і таблицю 2.1) на ΣT_3 [168]

$$\epsilon_3 = \frac{\Sigma E_3}{m_{р.в}} = \frac{\Sigma T_3 N_{e\Sigma}}{m_{р.в}}. \quad (2.3)$$

Кінцева вологість U_k порції матеріалу після її віброударного зневоднення визначалась ваговим методом [127] (див. пункт 1.2.1), з використанням формули (1.2). При цьому маса m_p рідинної фази у порції після зневоднення визначалась як різниця загальної маси m_m даної порції та маси m_m в ній твердої фази після повного висушування останньої. Значення m_m , m_m визначалась за допомогою електронної ваги (m_m складала 35 г).

Експерименти з визначення параметрів ефективності досліджуваних процесів – $P_{3,p}$, ϵ_3 та U_k , при почерговій зміні одного з параметрів навантаження – z_{1a} , ν , $p_{г.маx}$, ν_n (значення ν_n визначалась за допомогою секундоміра), повторювались 10 разів для зменшення похибки вимірювань та обробки результатів [169, 170], після чого обчислювалось середньоарифметичне значення кожного параметра (див. підрозділ 6.4), що застосовувалось при побудові графіків на рисунках 2.4 – 2.6.

Аналіз залежностей на рисунку 2.4 показує, що продуктивність $P_{3,p}$ віброударного зневоднення зі збільшенням амплітуди z_{1a} та частоти ν коливань вібростолу стенду, а також максимального тиску $p_{г.маx}$ у порожнині гідроциліндра ГП - збільшується, а з підвищенням швидкості ν_n переміщення піддону $P_{3,p}$ падає. При цьому нарощування ν забезпечує збільшення $P_{3,p}$ лише до певної межі ($\nu = 35$ Гц – при зневодненні кавового шламу), а при подальшому підвищенні даного параметра навантаження в результаті більш інтенсивного розпушування нижніх шарів порції шламу, а також того, що видалена рідина не встигає витікати через отвори піддону і відсмоктується назад у середовище порції - $P_{3,p}$ починає падати [43]. Найбільш помітне збільшення $P_{3,p}$ забезпечується при зростанні $p_{г.маx}$.

Енергоємність ϵ_3 віброударного зневоднення (див. рисунок 2.5), навпаки, зі збільшенням z_{1a} , ν та $p_{г.маx}$ зменшується (що обумовлено зростанням $m_{р.в}$), а з підвищенням ν_n – збільшується, що пояснюється зменшенням тривалості процесу зневоднення одиниці маси порції вологого дисперсного матеріалу.

Що стосується кінцевої вологості U_k матеріалу, то остання зі збільшенням z_{1a} , ν та $p_{г.маx}$ зменшується, а зі збільшенням ν_n зростає (див. рисунок 2.6).

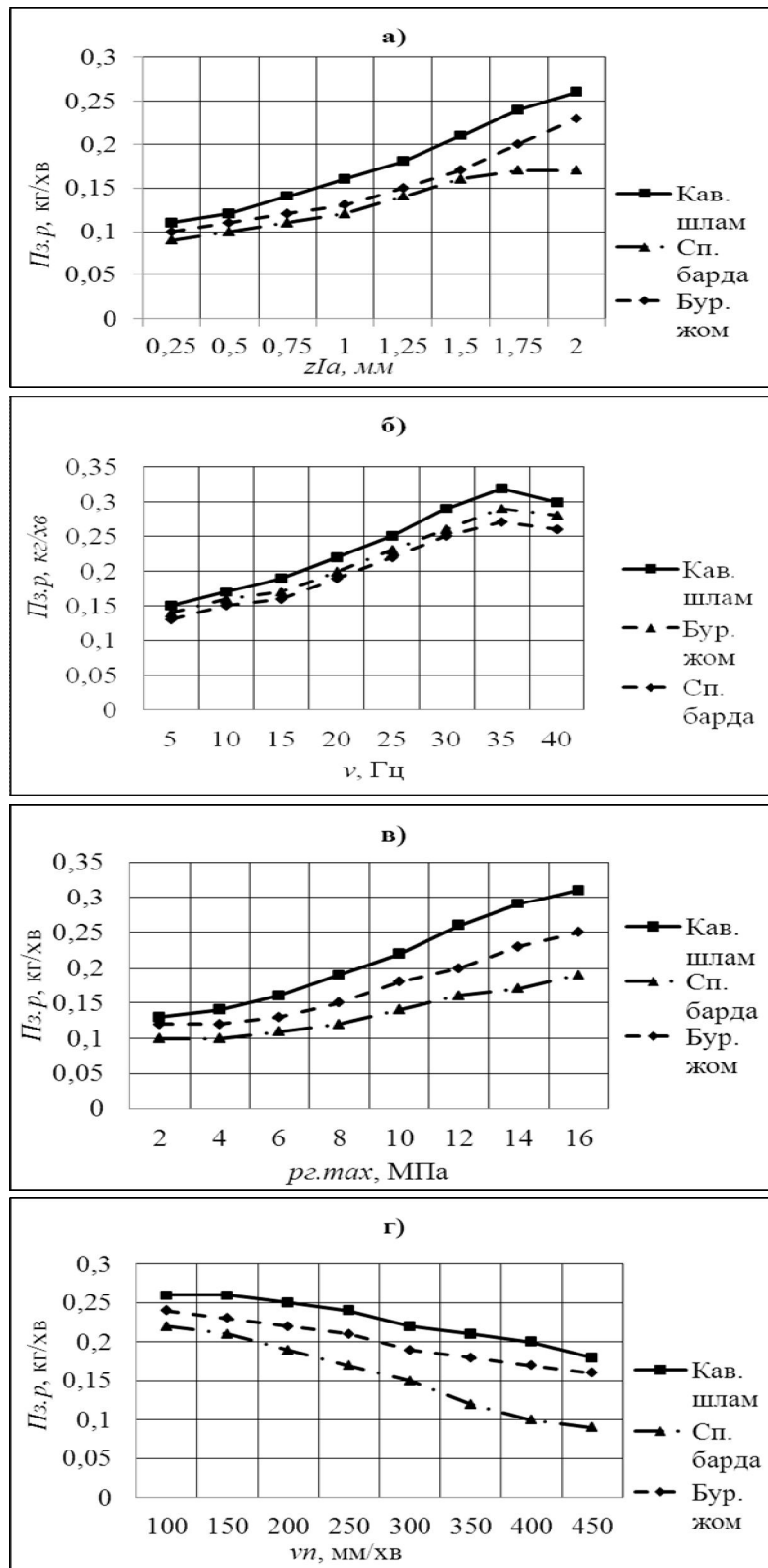


Рисунок 2.4 – Експериментальні залежності продуктивності $P_{z.p.}$ віброударного зневоднення від: а - амплітуди zIa коливань вібростолу при $\nu = 30$ Гц; $p_{z.max} = 11$ МПа; $\nu n = 300$ мм/хв; б - частоти ν коливань вібростолу при $zIa = 1$ мм; $p_{z.max} = 11$ МПа; $\nu n = 300$ мм/хв; в – тиску $p_{z.max}$ у порожнині гідроциліндра ГПІ при $zIa = 1$ мм; $\nu = 30$ Гц; $\nu n = 300$ мм/хв; г – швидкості νn переміщення піддону при $zIa = 1$ мм; $\nu = 30$ Гц; $p_{z.max} = 11$ МПа

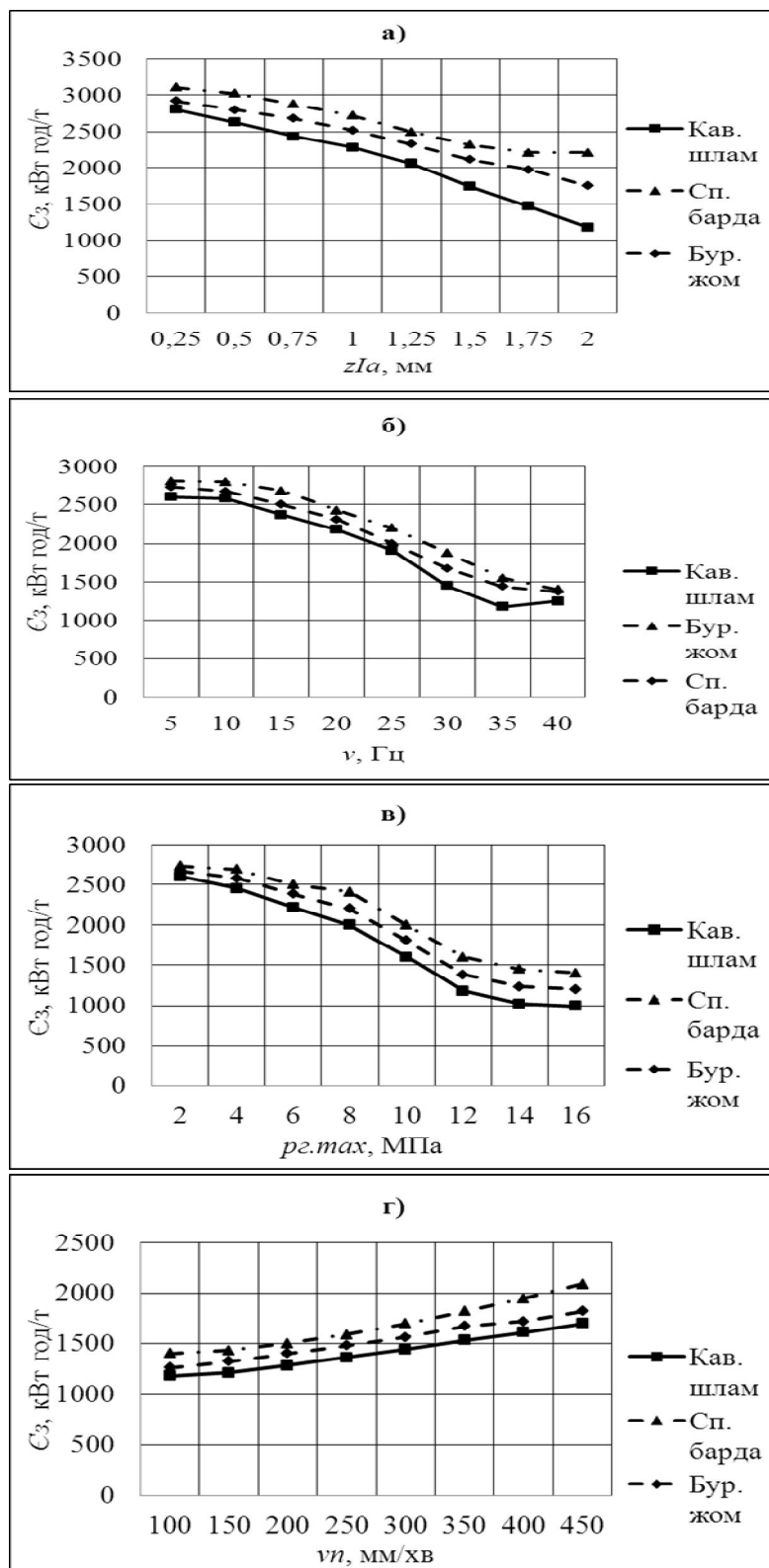


Рисунок 2.5 – Експериментальні залежності енергоємності E_z віброударного зневоднення від: а - амплітуди z_{Ia} коливань вібростолу при $\nu = 30$ Гц; $p_{z.max} = 11$ МПа; $\nu_n = 300$ мм/хв; б - частоти ν коливань вібростолу при $z_{Ia} = 1$ мм; $p_{z.max} = 11$ МПа; $\nu_n = 300$ мм/хв; в – тиску $p_{z.max}$ у порожнині гідроциліндра ГП при $z_{Ia} = 1$ мм; $\nu = 30$ Гц; $\nu_n = 300$ мм/хв; г – швидкості ν_n переміщення піддону при $z_{Ia} = 1$ мм; $\nu = 30$ Гц; $p_{z.max} = 11$ МПа

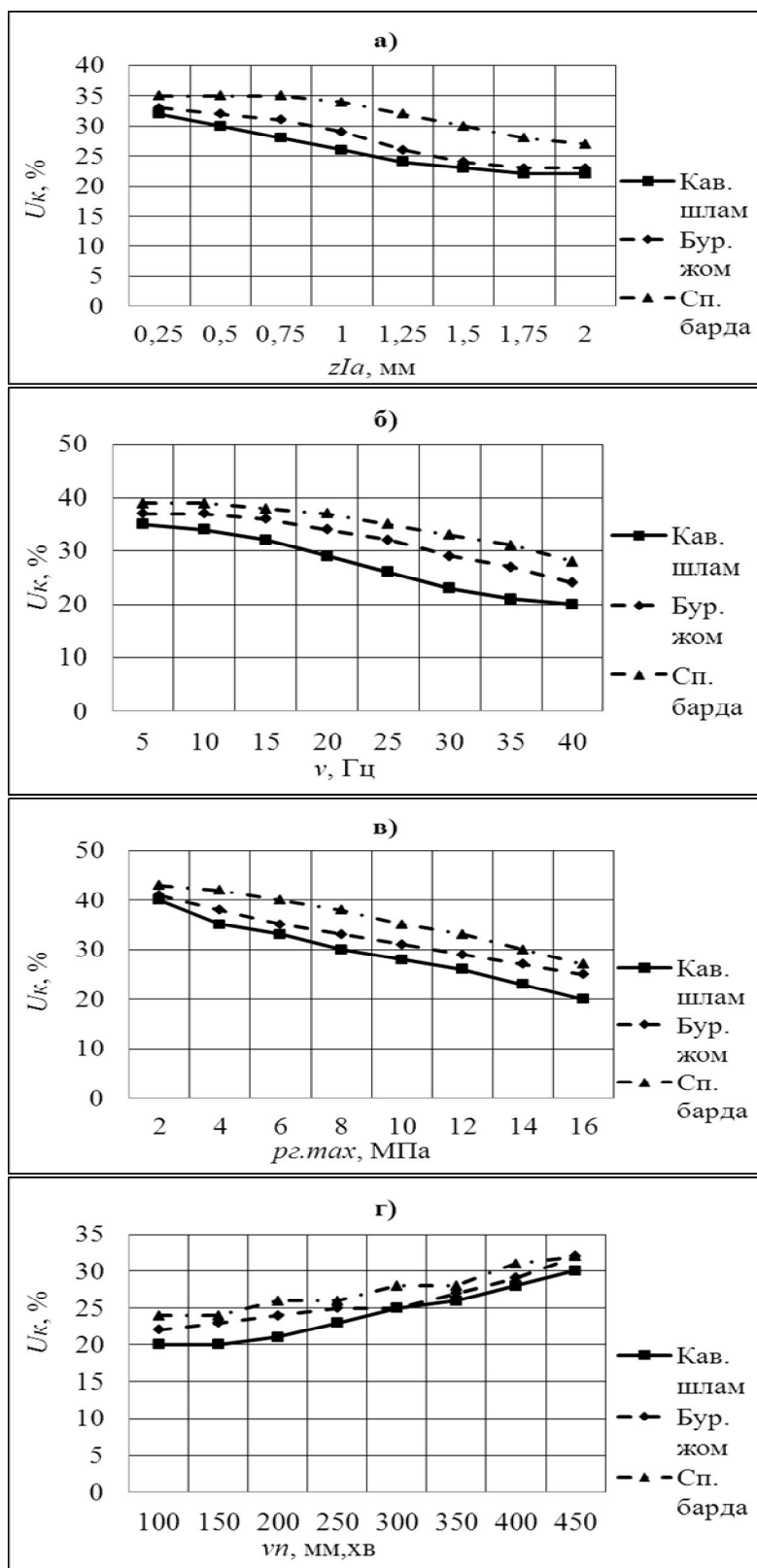


Рисунок 2.6 – Експериментальні залежності кінцевої вологості U_k порції матеріалу після його зневоднення від: а - амплітуди z_{1a} коливань вібростолу при $\nu = 30$ Гц; $p_{г.max} = 11$ МПа; $\nu_n = 300$ мм/хв; б - частоти ν коливань вібростолу при $z_{1a} = 1$ мм; $p_{г.max} = 11$ МПа; $\nu_n = 300$ мм/хв; в - тиску $p_{г.max}$ у порожнині гідроциліндра ГІП при $z_{1a} = 1$ мм; $\nu = 30$ Гц; $\nu_n = 300$ мм/хв; г - швидкості ν_n переміщення піддону при $z_{1a} = 1$ мм; $\nu = 30$ Гц; $p_{г.max} = 11$ МПа

Найвища продуктивність $P_{з,р}$ робочого процесу забезпечується під час зневоднення кавового шламу (див. рисунок 2.4), дещо нижча – при зневодненні бурякового жому та найнижча – під час зневоднення спиртової барди. Відповідно енергоємність $\epsilon_з$ буде найнижчою в процесі зневоднення шламу (див. рисунок 2.5), тоді як процеси зневоднення жому та барди є більш енергоємними. Найнижча кінцева вологість U_k концентрату (20%) забезпечувалась при зневодненні шламу (див. рисунок 2.6), а жом і барда зневоднювались в дещо меншій степені (мінімальна U_k відповідно 22% і 24%). Однак в цілому різниця у значеннях параметрів ефективності під час віброударного зневоднення основних видів вологих дисперсних відходів харчових виробництв є несуттєвою.

2.3 Порівняння ефективності пропонованого способу з ефективністю інших способів зневоднення

Основною перевагою пропонованого способу у порівнянні із іншими механічними способами, є забезпечення істотно нижчої кінцевої вологості ($U_k = 20 \dots 24\%$) матеріалу. Як вказувалось у підрозділі 1.1, після зневоднення спиртової барди та пивної дробини на стрічкових і шнекових пресах, декантерних та вібраційних центрифугах $U_k = 30 \dots 77\%$, а при зневодненні на віброситах - $U_k = 80 \dots 90\%$. Правда деякі шнекові преси для зневоднення бурякового жому здатні забезпечити його кінцеву вологість в межах $U_k = 30 \dots 40\%$, але при інтенсивному забиванні фільтрувальних отворів та суттєвому зниженні продуктивності [31]. Використовуваний нами стенд (див. рисунки 2.1, 2.4, 2.5) поступається вищезазваному обладнанню за продуктивністю $P_{з,р}$ та енергоємністю $\epsilon_з$ (наприклад, для шнекового преса ВПД-7 при зневодненні спиртової барди дані параметри складають $P_{з,р} = 23,3$ кг/хв та $\epsilon_з = 5$ кВт·год/т [34]), але це обумовлено тим, що стенд є дослідною машиною, створеною на базі обладнання іншого призначення, крім цього, після зневоднення матеріалів на шнековому пресі, вони обов'язково піддаються сушінню, таким чином загальна середня продуктивність процесу падає, а енергоємність суттєво зростає [171]. Так, згідно із даними [22, 172], енергоємність зневоднення спиртової барди на барабанній сушарці складає 2528 кВт·год/т, на розпилювальній сушарці – 2248 кВт·год/т, на двовальцевій сушарці – 1275 кВт·год/т [173]. Навіть при використанні для зневоднення бурякового жому найбільш економічних вакуумних сушарок $\epsilon_з = 740 \dots 760$ кВт·год/т [22, 174] (докладне обґрунтування економічної ефективності пропонованих способу та обладнання див. у роботах [5]). У підрозділі 7.2 наведені перспективні схеми промислового гідроімпульсного обладнання для віброударного зневоднення, що за $P_{з,р}$ та $\epsilon_з$ наближається до шнекових пресів при забезпеченні істотно нижчої U_k . Приблизно таку саму як у термічних способів енергоємність забезпечують й способи

електролітичного зневоднення [77, 79] (див. підрозділ 1.2). Що стосується обладнання для хімічного і біологічного зневоднення (див. підрозділ 1.2), то воно є настільки громіздким і дорогим [109, 113, 115], що практично жодне з вітчизняних підприємств харчової галузі не може собі дозволити придбати та використовувати його.

У додатку А наведено порівняння ефективності способів статичного пресування на гідравлічному двокошиковому пресі 2П-41 [22] та віброударного інерційного навантаження на експериментальному гідроімпульсному стенді, створеному на базі вібропреса ІВПМ-16 [64] (див. підрозділ 6.1), при зневодненні концентрату спиртової барди та пивної дробини. В результаті цих експериментів встановлено, що мінімальна кінцева вологість U_k матеріалу після зневоднення на статичному пресі була не нижчою 65%, тоді як при зневодненні на гідроімпульсному стенді $U_k = 55\%$. Тривалість ΣT_3 зневоднення способом статичного пресування складає не менше 20 хв, а при використанні віброударного навантаження $\Sigma T_3 = 20 - 25$ с (від ΣT_3 залежить продуктивність $P_{з.р}$ досліджуваних процесів, див. формулу (2.1)). Нарешті, максимальне зусилля $F_{мz\Sigma max}$, створюване виконавчим елементом 2П-41 на частинках порції вологого дисперсного матеріалу складає 1271700 Н проти 30217,7 Н для гідроімпульсного стенду [23], що обумовлює істотно менші енергетичні витрати при експлуатації останнього.

Таким чином, високу ефективність пропонованого способу віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів на обладнанні з ГП у порівнянні із ефективністю інших способів можна вважати експериментально доведеною.

3 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ТА КОНСТРУКТИВНИХ СХЕМ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВІБРОУДАРНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ ВОЛОГИХ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ

3.1 Розробка послідовності реалізації технологічних процесів віброударного фазового розділення

Для підвищення ефективності способів віброударного зневоднення та фільтрування (див. розділ 2) рекомендується реалізовувати їх у декілька послідовних стадій, з використанням на кожній з них окремої одиниці обладнання та підвищенням від стадії до стадії інтенсивності навантаження вологих дисперсних матеріалів [5, 174, 175].

На рисунку 3.1 представлена загальна послідовність реалізації розглянутих технологічних процесів [5].

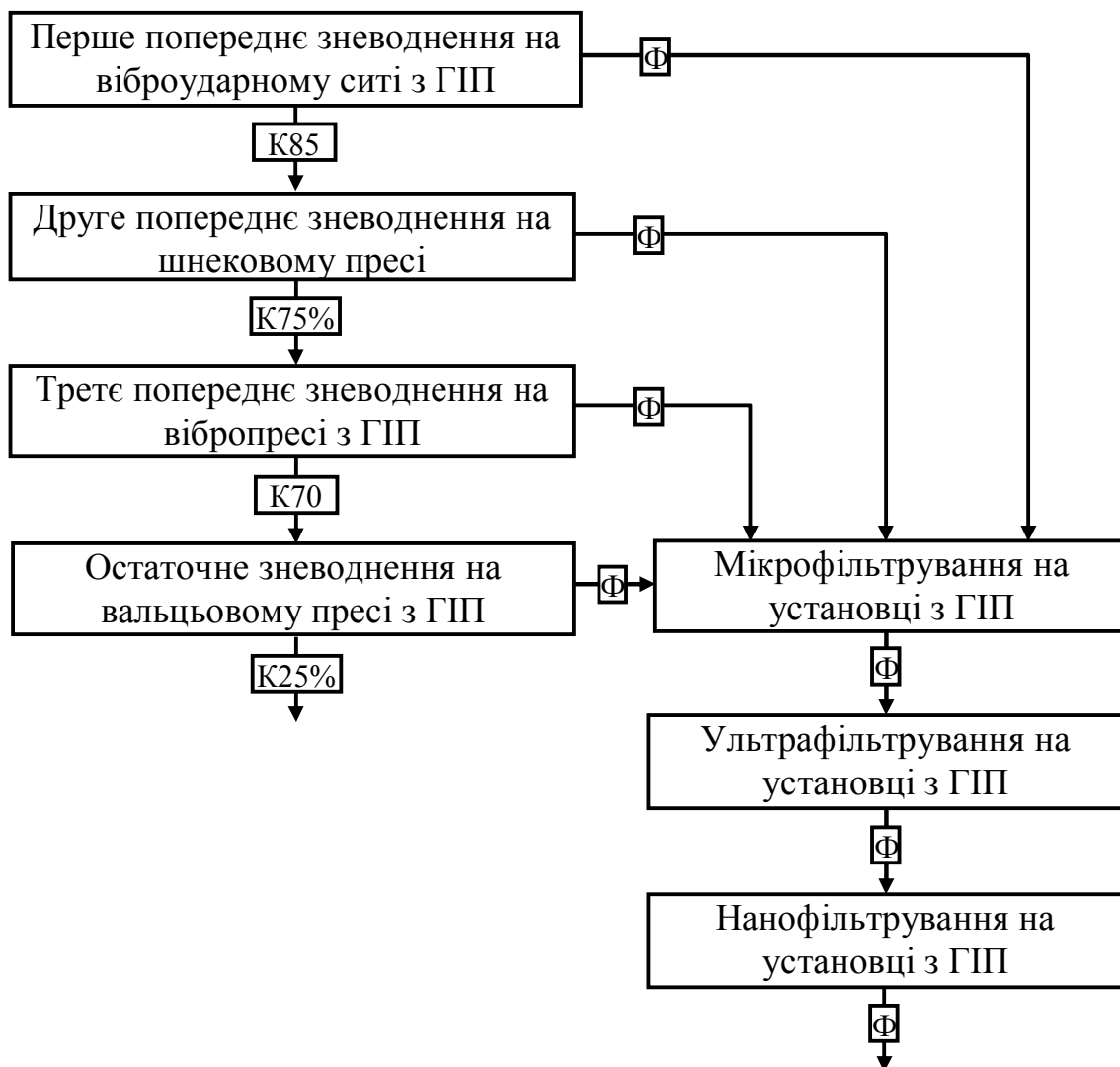


Рисунок 3.1 – Загальна послідовність технологічних процесів фазового розділення вологих дисперсних матеріалів

На першій стадії пропонованої технології (див. рисунок 3.1) здійснюється попереднє зневоднення вологого дисперсного матеріалу на гідроімпульсному віброударному ситі з одержанням концентрату вологістю 85% (K85%) та фільтрату (Ф). За основу даного сита, детально описаного у наступному підрозділі, взятий інерційний вібраційний грохот з дебалансним приводом [43, 55] (див. рисунок 1.6). Вибір даного обладнання обумовлений його високими продуктивністю та надійністю, низькою енергоємністю, а також придатністю для умов потокового виробництва. Сито дає можливість швидко відокремити значну частину рідинної фази матеріалу без великих енерговитрат.

Далі одержаний на попередній стадії концентрат проходить через шнековий прес [34], в якому продовжується процес його попереднього зневоднення до вологості 75% (K75%) з видаленням та збиранням фільтрату (Ф). Як відомо [34], шнекові преси відносяться до найбільш ефективного (високопродуктивного, надійного, малоенергоємного та компактного) обладнання для потокового зневоднення вологих дисперсних матеріалів (див. рисунок 1.3 та підрозділ 1.1). У даній технологічній лінії шнековий прес служить також для подачі під певним тиском концентрату через робочу зону гідроімпульсного вібропреса [64], на якому здійснюється його третє попереднє зневоднення до вологості 55% (K55%).

Гідроімпульсний вібропрес також забезпечує високу продуктивність робочого процесу при мінімальних витратах енергії, порівняно невеликих габаритах і масі, має широкі технологічні можливості щодо реалізації різних схем та параметрів віброударного інерційного навантаження вологих дисперсних матеріалів [71], виходячи з їх заданих початкових та кінцевих фізико-механічних характеристик. Даний вібропрес може бути створений на базі ІВПМ [64].

Остаточне зневоднення концентрату здійснюється на вальцьовому пресі з ГП [19], між вальцями якого потік концентрату проходить досить тонким шаром, але у безперервному режимі, що дозволяє видаляти з нього практично всю фізико-механічну та фізико-хімічно зв'язану рідину (Ф) – кінцева вологість концентрату (K) порядку 25%. Крім цього, дане обладнання має достатню надійність та продуктивність, малу енергоємність та матеріалоемність, є компактным і простим за конструкцією та в обслуговуванні, може бути реалізованим на базі серійних вальцьових пресів [34, 40].

3.2 Розробка конструктивних схем гідроімпульсного обладнання для віброударного зневоднення

У даному підрозділі наведені розроблені нами конструктивні схеми гідроімпульсного обладнання, на якому може бути реалізований описаний

у підрозділі 3.1 технологічний процес віброударного фазового розділення вологих дисперсних матеріалів [5].

На рисунку 3.2 показана схема гідроімпульсного віброударного сита [176], що застосовується на стадії першого попереднього зневоднення матеріалу (див. рисунок 3.1). Сито (див. рисунок 3.2) містить несучу конвеєрну стрічку 4, яка проходить навколо підтримуючих 5, 8 та ведучого роликів 19, що з'єднаний з валом електродвигуна 20. Приймальний бак 14 встановлений на рамі 9 під верхньою гілкою стрічки 4, яка, в свою чергу розташовується під кутом 10...20° до горизонтальної поверхні. Стрічка 4

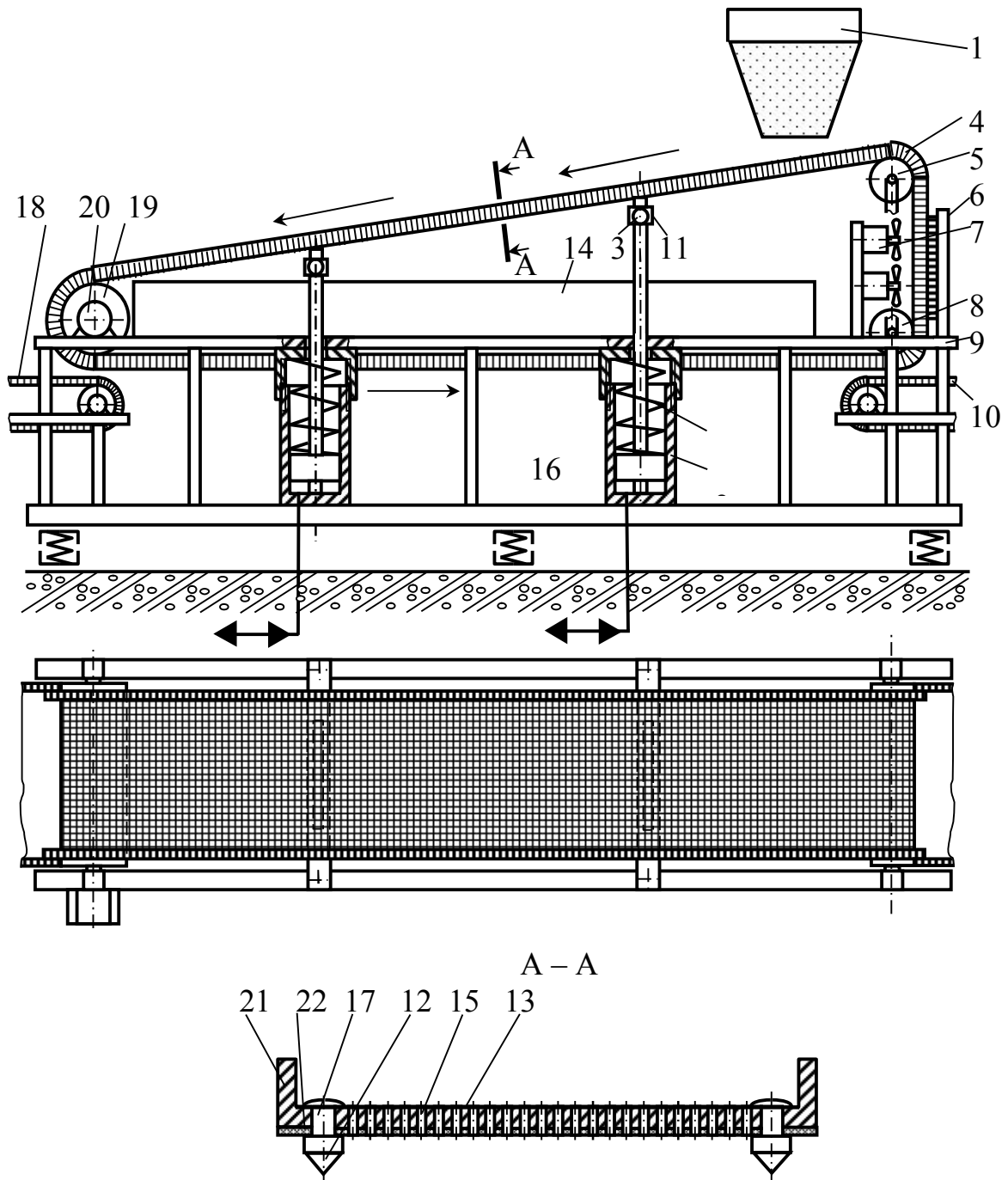


Рисунок 3.2 – Конструктивна схема гідроімпульсного віброударного сита для попереднього поточкового зневоднення вологих дисперсних матеріалів

виконана на гумовотканинній основі 22, до якої заклепками 17 кріпляться сталеві П-подібні пластини 21 шириною 30...50 мм. У кожній пластині та гумовотканинній основі виконані наскрізні дрібні отвори 15, закриті фільтрувальною сіткою 13. Заклепки 17 стрічки 4 мають знизу конічні головки 12, що входять у отвори на поверхні ведучого ролика 19 для забезпечення його необхідної тягової спроможності [164]. Бункер 1 для матеріалу, що зневоднюється, встановлений над стрічкою 4. На рамі 9 також вертикально закріплені чотири гідроциліндри 2 ГП, у штокових порожнинах яких встановлені пружини 16. При цьому штоки гідроциліндрів 2 попарно з'єднуються за допомогою шарнірів 3 з двома поперечинами 11, на які спирається верхня гілка стрічки 4. Збоку від вертикальної гілки стрічки, на рамі 9 встановлені вентилятори 7 для її обдування і просушування, а також щітка 6 для очищення фільтрувальної сітки. З обох сторін стрічки 4 під її нижньою гілкою встановлені додаткові стрічкові конвеєри 10, 18 для відведення твердої фази матеріалів.

Гідроімпульсне віброударне сито працює таким чином. Вмикаються електродвигун 20 привода ведучого ролика 19, ГП гідроциліндрів 2, вентилятори 7, та додаткові стрічкові конвеєри 10, 18. Вологий дисперсний матеріал завантажується у бункер 1 і виливається з нього рівномірним шаром на верхню гілку стрічки 4, що безперервно рухається в напрямку, показаному стрілками, по всій її ширині. В результаті матеріал скочується по верхній гілці стрічки 4 вниз – частково разом з нею, частково самопливом. Поршні гідроциліндрів 2 здійснюють вертикальні зворотно-поступальні переміщення з поверненням у вихідні нижні положення під впливом пружин 16. Від поршнів рух через шарніри 3 передається двом поперечинам 11, що забезпечують у двох поперечних перерізах коливання верхньої гілки стрічки 4. Завдяки цьому, рідинна фаза матеріалу з високою інтенсивністю проходить через фільтрувальну сітку 13, отвори 15 у П-подібних пластинах 21 та гумовотканинній основі 22 несучої стрічки і збирається у приймальному баку 14. Тверда фаза матеріалу затримується сіткою 13 і скидається з неї на конвеєр 18. Видалені щіткою 6 з сітки 13 залишки твердої фази, падають на конвеєр 10. Концентрат з конвеєрів 18, 10 подається для подальшого зневоднення до шнекового пресу (див. рисунок 3.1), а фільтрат з баку 14 – на стадію мікрофільтрування.

Далі на рисунку 3.3 представлена схема комплексу для другого і третього зневоднення вологого дисперсного матеріалу (див. рисунок 3.1). Комплекс може бути створений на базі шнекового преса [40] та ІВПМ, наприклад моделі ІВПМ-16 [64]. Потік концентрату подається через патрубок 12 у циліндр 10 (див. рисунок 3.3) шнекового преса, що приводиться від електродвигуна 13 через редуктор 14. Під час переміщення і стискання у циліндрі 10 концентрату видалений з нього фільтрат, стікає через дрібні отвори у циліндрі 10, закриті з середини фільтрувальною сіткою, у зовнішній циліндр 11, звідки йде на

мікрофільтрування. Зневоднений концентрат через патрубок 16 та гумовотканинний рукав 17 потрапляє до прес-форми 26 ІВПМ, після заповнення якої шнековий прес зупиняється. Вмикаються основний та допоміжний приводи ІВПМ, вібростіл 18 якого, зв'язаний з гідроциліндром 25 ГП, здійснює зворотно-поступальні вертикальні переміщення, створюючи знизу віброударне навантаження порції матеріалів. Зверху концентрат у прес-формі 26 навантажений інерційним зусиллям, створюваним пуансоном 4, рухомою траверсою 9 з інерційними вантажами 8, а також статичним зусиллям, яке забезпечує допоміжний гідроциліндр 1 [64]. Віджата в результаті цього рідина виводиться через закриті фільтрувальною сіткою отвори прес-форми 26, (на схемі не показані), стікає у жолоб 19 навколо вібростолу, а далі по еластичній трубці 20 у бак 21, з якого йде на мікрофільтрування [125]. Після зневоднення порції 23 до заданої кінцевої вологості (див. рисунок 3.1), ГП вимикається, а траверса 9 з пуансоном 4 піднімаються вгору до упору траверси у обмежувачі 7. При цьому заслінка 5, що під час зневоднення перекриває патрубок 6, також піднімається. Вмикається шнековий прес,

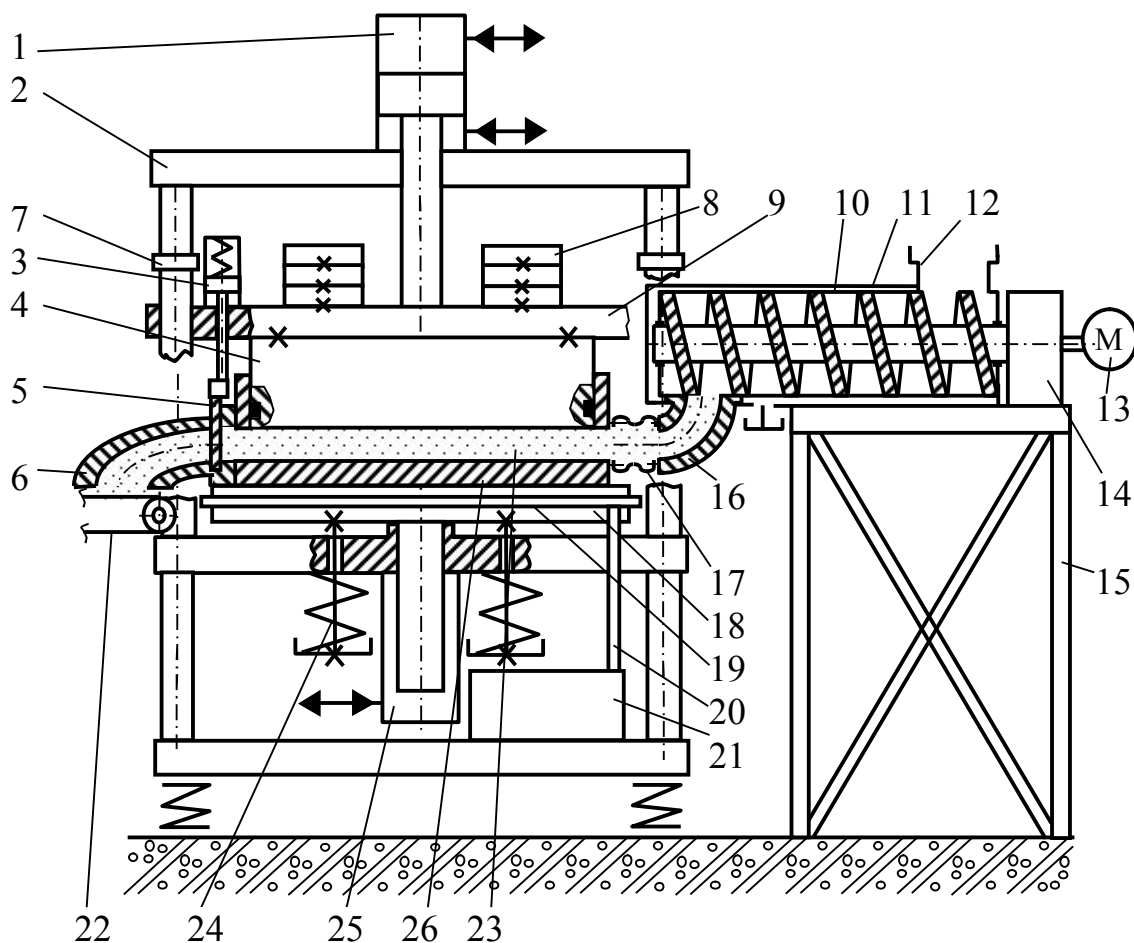
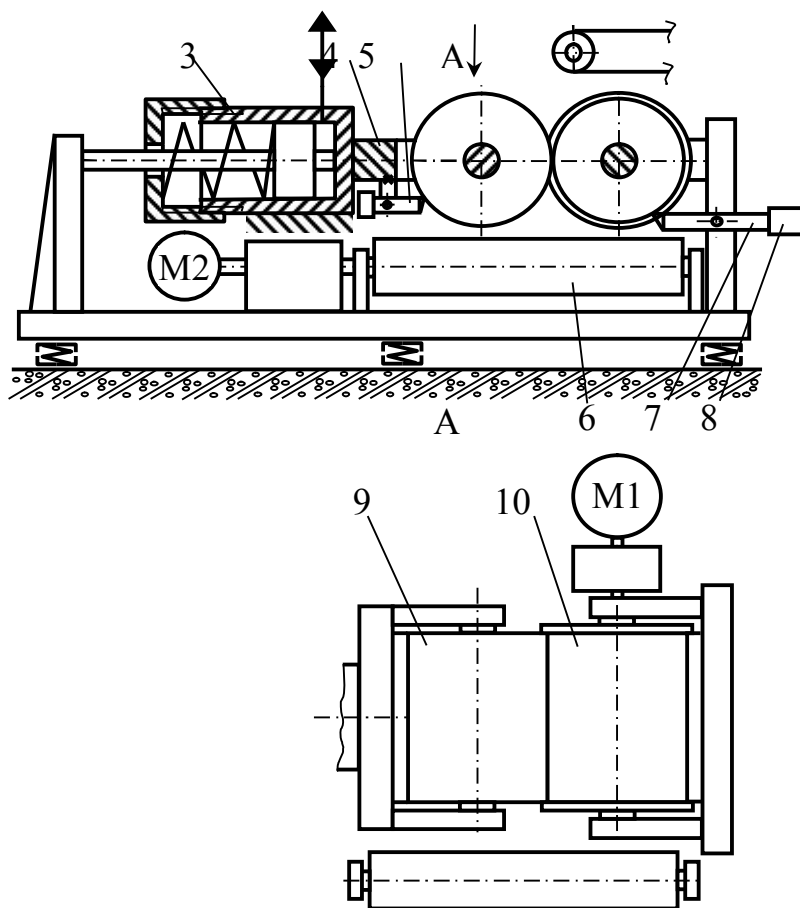


Рисунок 3.3 – Конструктивна схема технологічного комплексу на базі шнекового преса та вібропреса з ГП для попереднього зневоднення вологих дисперсних матеріалів

що забезпечує витискання зневодненої порції через патрубок 6 на конвеєр 22 та заповнення прес-форми 26 наступною порцією матеріалу. Далі шнековий прес вимикається, опускається траверса 8 та вмикається ГП; цикл зневоднення вологого дисперсного матеріалу на ІВПМ повторюється. З конвеєра 22 зневоднений на ІВПМ концентрат подається до вальцьового преса з ГП (рисунок 3.4) для остаточного зневоднення [177].

На вальцьовому пресі [19] концентрат проходить у зазор між ведучим 10 та веденим 9 вальцями, які повільно обертаються. Крім цього, валець 9 періодично підтискається до вальця 10 із заданою частотою та



амплітудою, що визначаються

настройками ГП.

Вказані навантаження передаються через вилку 4, при збільшенні тиску

робочої рідини у поршневій порожнині гідроциліндра 3 ГП і зміщенні його корпуса

відносно нерухомих поршня зі штоком праворуч за схемою. На етапах падіння тиску в

гідросистемі ГП корпус 3, а з ним і валець 9 під дією стисненої пружини у

штоковій порожнині гідроциліндра повертаються у вихідне

ліве положення. В результаті концентрат матеріалів затягується

в зазор між вальцями

де він піддається статичному та віброударному навантаженню. Витиснена з концентрату рідина проходить через дрібні отвори у вальцях, закритих

металевою фільтрувальною сіткою. Далі з порожнин вальців вона стікає по

трубках у контейнер-збірник і перекачується до гідроімпульсної установки для мікрофільтрування. Віджати концентрат зрізається з поверхонь

вальців ножами 5, 7 відповідної ширини, які підтискаються до вальців за допомогою вантажів 8. Відокремлений таким чином концентрат,

Рисунок 3.4 – Конструктивна схема вальцьового преса з ГП для остаточного зневоднення вологих дисперсних матеріалів

де він піддається статичному та віброударному навантаженню. Витиснена з концентрату рідина проходить через дрібні отвори у вальцях, закритих металевою фільтрувальною сіткою. Далі з порожнин вальців вона стікає по трубках у контейнер-збірник і перекачується до гідроімпульсної установки для мікрофільтрування. Віджати концентрат зрізається з поверхонь вальців ножами 5, 7 відповідної ширини, які підтискаються до вальців за допомогою вантажів 8. Відокремлений таким чином концентрат,

скидається на стрічковий конвеєр 6, на якому він транспортується до контейнера.

ІВПМ з ГП для попереднього віброударного зневоднення матеріалів (див. рисунок 3.3) не забезпечує безперервності робочого процесу, тому для надійного і ритмічного функціонування всього комплексу (див. рисунок 3.1), усунення ймовірності затримок подачі концентрату та зниження загальної продуктивності обладнання можливе установлення між ІВПМ та вальцьовим пресом для остаточного зневоднення концентрату (див. рисунок 3.4) достатньо об'ємного бункера. Крім цього, потрібно врахувати, що робота установок для потокового віброударного фільтрування також здійснюється при періодичному порціонному поповненні бака 12 для фільтрата.

3.3 Розробка вимог до процесів і обладнання для віброударного зневоднення

З врахуванням наведених у двох попередніх підрозділах схем процесів і обладнання для віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів були розроблені основні вимоги до них [5, 178]:

1. Всю послідовність процесів віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів потрібно поділити на декілька стадій, на кожній з яких застосовувати окрему одиницю обладнання.

2. При переході від першої до останньої стадії зневоднення об'єми відокремлюваної з матеріалу рідинної фази зменшуються, що обумовлено зменшенням вмісту в ньому вільної рідини. У зв'язку із чим, для збереження на останніх стадіях достатньо високої продуктивності та ефективності процесу потрібно збільшувати інтенсивність віброударного навантаження і зменшувати товщину шару матеріалу, що зневоднюється [179, 180]. З врахуванням вищевикладеного, на першій стадії зневоднення матеріал, що повільно переміщується на відкритій сітковій стрічці, піддається віброударним впливам знизу. На другій стадії він обтискається у циліндрі шнекового преса. На третій стадії концентрат матеріалу навантажується у прес-формі закритого типу (знизу діють віброударні імпульси, зверху інерційне та статичне навантаження). На четвертій стадії тонкий шар концентрату піддається двосторонньому віброударному та статичному навантаженню.

3. У ГП обладнання для віброударного зневоднення повинна бути передбачена можливість безступінчастого, незалежного і точного регулювання основних параметрів навантаження (тиску у порожнині гідроциліндра ГП, частоти і амплітуди коливань виконавчих елементів), а також збереження їх стабільних значень по завершенню регулювання [64, 65].

4. Обладнання технологічного комплексу для віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів доцільно створювати на базі відомих статичних, вібраційних та віброударних машин: шнекових та вальцьових пресів, вібраційних грохотів з дебалансним приводом, інерційних вібропрес-молотів з ГП [11, 34, 43, 64, 181, 182, 183].

5. Вузли обладнання, що є джерелами шуму підвищеного рівня потрібно закривати звукопоглинальними чохлами. Обов'язкові також надійна віброізоляція його станин, система комп'ютерного дистанційного керування та регулювання [184].

6. Обладнання має оснащуватись системою датчиків контролю основних параметрів навантаження процесів та діагностики його технічного стану [185].

4 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ ВІБРОУДАРНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ ВОЛОГИХ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ

4.1 Аналіз закономірностей протікання та ефективності процесів віброударного зневоднення

Дослідженнями [64] встановлено, що вібраційні та віброударні навантаження забезпечують досить високу ефективність при використанні їх в різних технологічних процесах. Зокрема, при вібраційному та віброударному пресуванні сухих порошкових матеріалів відмічено зменшення максимального потрібного зусилля на заготовці у 2,5 – 10 разів [64] у порівнянні із значенням даного параметра в процесі статичного пресування, при забезпеченні адекватної густини та міцності, вищої рівногустини та кращої якості поверхонь готових виробів. Крім цього, зменшується зношування прес-форм і з'являється можливість виготовлення їх з тонкішими стінками [65]. Така ефективність вібраційних та віброударних процесів обумовлюється зменшенням при їх реалізації коефіцієнтів тертя між частинками порошкового матеріалу, та між частинками і прес-формою, збільшенням їх рухомості в напрямку прикладеного зусилля та кращим прослизанням одних твердих частинок відносно інших [64]. При цьому ущільнення дисперсного середовища найефективніше відбувається у випадку збігу частоти зовнішнього вібраційного впливу з власною частотою частинок порошкового матеріалу, оскільки в результаті цього мають місце резонансні явища.

У роботі [64] встановлено, що найраціональнішим способом забезпечення резонансу частинок порошкової заготовки в процесі її ущільнення є віброударне пресування, а найкращим обладнанням для його здійснення – інерційні вібропрес-молоти з гідроімпульсним приводом (ІВПМ) [65]. Висока ефективність даних способу та обладнання при формоутворенні сухих порошкових заготовок обґрунтована резонансно-структурною теорією [64] (див. підрозділ 1.3).

Теоретично можна обґрунтувати [70], що при використанні вібрацій та ударів у технологічних процесах зневоднення вологих дисперсних матеріалів харчових виробництв результати будуть ще кращими, ніж при здійсненні з їх допомогою ущільнення сухих порошоків, оскільки в першому випадку тверді частинки матеріалів знаходяться у зваженому зануреному у рідинній фазі стані, отже мають додаткову рухомість в напрямку прикладеного зусилля, більшу схильність до ущільнення та зменшення займаного об'єму, завдяки чому і забезпечується витікання рідини. До цього ж, коефіцієнти в'язкого тертя одних твердих частинок матеріалів відносно інших та тертя частинок відносно внутрішніх поверхонь прес-форми завдяки наявності у просторах між ними рідини, є

меншими у порівнянні із аналогічними коефіцієнтами при ущільненні сухих сумішей [186]. З іншої сторони, відмічене тертя частинок під час динамічного навантаження є значно інтенсивнішим, ніж при статичному, у зв'язку із чим їх температура, а разом з нею і рухомість частинок є вищими.

У попередніх розділах монографії розглядалися схеми гідроімпульсного обладнання для остаточного зневоднення вологих дисперсних матеріалів (див. рисунки 1.8, 2.1), на яких може бути реалізоване віброударне інерційне навантаження порції матеріалів мінімальної висоти для максимально повного їх зневоднення. Але такі схеми раціональні при невеликих обсягах матеріалів, що зневоднюються, після того як більша частина рідини вже видалена на попередній стадії у прес-формі закритого типу [34, 64]. На рисунку 4.1 показана схема віброударного інерційного навантаження порції вологого дисперсного матеріалу в процесі його попереднього зневоднення у такій прес-формі на гідроімпульсному вібропресі [187] (див. рисунок 3.3). На схемі (див. рисунок 4.1) позначені: m_I – маса нижнього виконавчого елемента – вібростолу та жорстко зв'язаних з ним елементів – плунжера гідроциліндра ГПІ та прес-форми; m_{II} – маса верхнього виконавчого елемента – пуансона

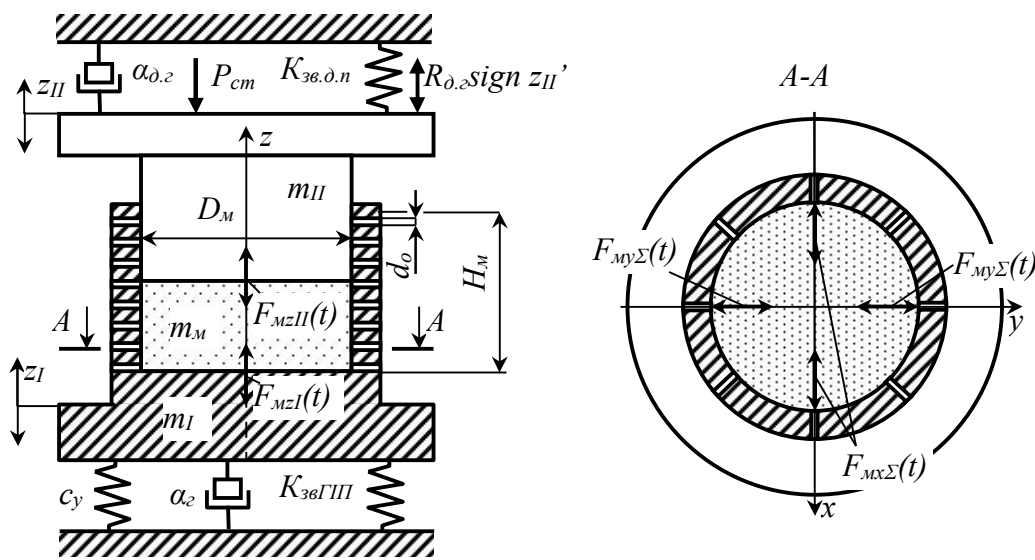


Рисунок 4.1 – Схема віброударного інерційного навантаження порції вологого дисперсного матеріалу в процесі його попереднього зневоднення у прес-формі закритого типу

діаметром D_M , а також деталей, з якими він зв'язаний – рухомої траверси з інерційними вантажами, поршня і плунжера допоміжного гідроциліндра; m_m – маса порції матеріалу у прес-формі; $z_I, z_{II}, z_I', z_{II}'$ – переміщення та швидкості виконавчих елементів; c_y – жорсткість елементів пружного повернення вібростолу; $\alpha_z, \alpha_{д.з}$ – коефіцієнти в'язкого демпфірування при переміщенні плунжера гідроциліндра ГПІ та поршня допоміжного

гідроциліндра; $R_{d,sign z_{II}'}$ – сила сухого тертя при переміщенні верхнього виконавчого елемента; P_{cm} – зусилля статичного притискання пуансона до порції оброблюваного матеріалу; $K_{звГП}$, $K_{зв.д.n}$ – зведені модулі об'ємної пружності підсистем ГП та допоміжного привода при створенні зусилля P_{cm} (див. підрозділ 4.2); $F_{mzI}(t)$, $F_{mzII}(t)$, $F_{mx\Sigma}(t)$, $F_{my\Sigma}(t)$ – поточні значення зусиль, створюваними на частинках порції матеріалу відносно осей z , x , y виконавчими елементами гідроімпульсного вібропреса (див. підрозділ 4.2); d_o – діаметри отворів у прес-формі, що закриті фільтрувальною сіткою.

Як вказувалось у пункті 1.2.1, рідину у розглядуваних матеріалах можна умовно розділити на вільну та зв'язану [145], при цьому для відокремлення останньої потрібні значні енергетичні витрати на подолання сил зчеплення, зусилля опору при переміщенні рідини по каналах, а також на деформування структури твердої фази [70]. Слід також зважити на те, що вказаний опір при переміщенні збільшується зі зростанням сили стискання, внаслідок зменшення перерізів каналів [58]. Сили зчеплення, внаслідок наявності яких частинки матеріалу притягуються одна до одної та утримують навколо себе рідинні оболонки, називаються молекулярними або адсорбційними [127].

Очевидно, що для видалення з вологих дисперсних матеріалів рідини і забезпечення її витікання назовні необхідно порушити молекулярні зв'язки, що є між частинками твердої та рідинної фаз, тобто подолати міжмолекулярні сили [142]. Але окрім сил взаємного притягання, між молекулами рідини та твердих частинок діють і сили відштовхування, в результаті чого молекули за відсутності зовнішнього навантаження

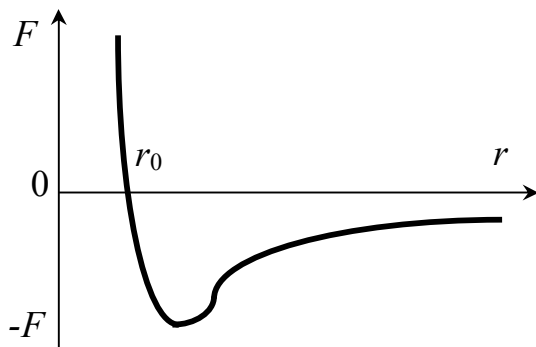


Рисунок 4.2 – Залежність сили взаємодії F молекул рідини та твердого тіла від відстані r між ними

коливаються біля положень рівноваги. Проблема полягає у тому, що для стискання як твердих тіл, так і рідин необхідно прикласти величезні статичні зусилля, оскільки зі зменшенням відстаней r між молекулами сили їх відштовхування F наростають значно інтенсивніше, ніж сили притягання $-F$ (рисунок 4.2) [70, 188]. На відстанях r порядку 10^{-9} м діють сили притягання, а на відстанях 10^{-10} сили відштовхування. Сила міжмолекулярної взаємодії F є рівнодіючою вказаних сил і може

бути розрахована за формулами [188]

$$F(r) = -\frac{a}{r^7} \text{ при } r > r_0; F(r) = 0 \text{ при } r = r_0; \quad (4.1)$$

$$F(r) = -\frac{b}{r^m}; \quad 9 < m < 15; \quad \text{при } r < r_0.$$

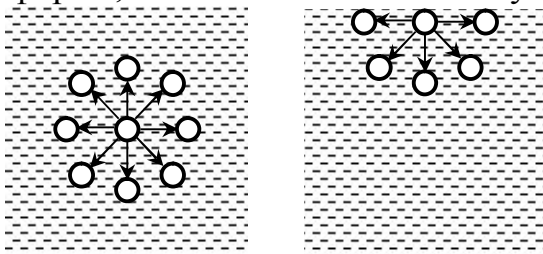
Значення коефіцієнтів a і b у формулах (4.1) залежать від структури молекул, але вони мало впливають на величину зусилля статичного навантаження, потрібного для стискання рідини [44]. Наприклад, для зменшення початкового об'єму порції води $W_n = 1$ л лише на 5% за рахунок тиску, його необхідно підвищити на [70]

$$\Delta p = \frac{\Delta W \cdot K_p}{W_n} = \frac{0,05 \cdot 2 \cdot 10^3}{1} = 100 \text{ МПа}. \quad (4.2)$$

У формулі (4.2) ΔW – зменшення об'єму; K_p – модуль об'ємної пружності рідини (у розглядуваному прикладі для води $K_p = 2 \cdot 10^3$ МПа).

Взагалі, проста модель, в якій молекули рідини вважаються твердими кулями в більшості дослідженнях дозволяє отримати правильні результати [189].

Як вже вказувалось вище, за відсутності зовнішнього навантаження, молекули в середині об'єму рідини коливаються біля власних положень рівноваги, оскільки сили притягнення, що діють з боку інших молекул взаємно врівноважуються [188] (рисунок 4.3, а). Щодо молекул розташованих на межі рідинної фази біля внутрішньої поверхні прес-форми, то вплив на них з боку інших молекул має місце тільки з однієї



а) б)

Рисунок 4.3 - Зв'язки молекул рідини, розташованих в середині об'єму порції (а) та на межі рідинної фази (б)

сторони і рівнодіюча сила притягнення таких молекул спрямована в середину об'єму рідини (рисунок 4.3, б). Тому, для їх переміщення із внутрішніх шарів до будь-якої із зовнішніх поверхонь (при видаленні рідини з порції вологого дисперсного матеріалу), необхідно виконати роботу проти вказаної рівнодіючої сили. Іншими словами, кожна молекула рідини, що знаходиться поблизу її поверхні, має у порівнянні із молекулами, розташованими в середині

об'єму певний надлишок потенціальної енергії, внаслідок чого, рідину поверхневих шарів називають зв'язаною, на відміну від незв'язаної рідини серединних шарів. Таким чином, при збільшенні загальної площі поверхні порції рідини (наприклад, при видаленні її з прес-форми у вигляді крапель) енергія рідинної фази буде зростати [188].

Крім цього, деякі молекули рідинної фази мають зв'язки і з твердими частинками матеріалу, що зневоднюється, відносно яких вони також

здійснюють коливальні рухи. Такі зв'язки є менш міцними, ніж чисто рідинні, але й для їх порушення необхідно прикласти величезні статичні зусилля [44]. Очевидно, що суттєво вища ефективність руйнування вказаних зв'язків у вологих дисперсних матеріалах забезпечується при реалізації віброударного інерційного навантаження [118], в чому можна переконатись на елементарному прикладі, якщо сито з вологим дисперсним матеріалом під час вертикального переміщення вниз різко зупинити (з ударом) об край столу або іншої твердої поверхні. При цьому навіть у випадку прикладання відносно невеличкого зусилля ударного навантаження видалиться помітно більше вологи, ніж при стисканні порції матеріалу у ситі аналогічним статичним зусиллям [70].

Як й при вібраційній обробці у продовж віброударного зневоднення вологих високодисперсних матеріалів потрібно забезпечити їх псевдозрідження та віброкипіння [71] (див. також пункт 1.2.3), оскільки в цьому випадку істотно знижуються енергетичні витрати, підвищується продуктивність процесу, а сам матеріал веде себе подібно в'язкій ньютонівській рідині, основні параметри якої визначаються ступенем руйнування структури [43]. Для приведення вологих дисперсних матеріалів у стан віброкипіння необхідно, щоб їх тверді частинки мали прискорення, які значно перевищують прискорення сили земного тяжіння [43]. В процесі віброударного імпульсного навантаження краще відбувається процес змішування, підвищується рівногустина матеріалу, а отже інтенсифікується й витікання рідини назовні. Створення вказаних величин прискорень під час віброударного пресування не представляє особливих труднощів, оскільки при роботі гідроімпульсного обладнання, зокрема промислових зразків ІВПМ, прискорення їх виконавчих елементів сягають $(8...10) \cdot g$ [64].

В загальному випадку фактичне значення віброприскорення в процесі зневоднення вологих дисперсних матеріалів можна вважати оптимальним, якщо забезпечуються максимальне руйнування однорідності структури їх частинок й водночас усувається ймовірність механіко-хімічної деструкції останніх [53]. Під час вібраційного зневоднення повного руйнування структури матеріалу, навіть й при реалізації найбільших прискорень виконавчих елементів обладнання домогтись неможливо; вона лише розпадається на окремі об'єми, обмежені поверхнею розриву, в яких процес структуроутворення відбувається ізольовано [43]. В процесі віброударного інерційного навантаження навпаки – структура порції матеріалу є постійно «зв'язаною» й такою, що від циклу до циклу ущільнюється за рахунок взаємного прослизання та повертання частинок, їх зміщення у менш заповнені твердою фазою порожнечі, утворення та руйнування «арок», «містків» та інших мікроструктур [64]. У зв'язку із цим, потужність гідроімпульсного обладнання у порівнянні із потужністю вібраційного обладнання

(наприклад, з дебалансним приводом) може бути істотно нижчою, при забезпеченні адекватної і більшої ефективності зневоднення.

Негативним фактором віброкипіння як при вібраційному, так і при віброударному зневодненні є вплив на матеріал аеродинамічних сил. На етапі руху вібростолу вниз і розвантаження порції матеріалу між її нижніми шарами і днищем прес-форми утворюється розрідження, з розпушенням твердих частинок. В результаті у проміжки між ними буде засмоктуватись атмосферне повітря (яке буде заходити через отвори у бокових стінках та днищі прес-форми), а також рідина, витиснена на етапах навантаження ближче до периферії порції [71]. Величина аеродинамічних сил залежить від густини та питомої газопроникності середовища, а також від режиму навантаження [43]. Дія їх негативно позначається на продуктивності процесу зневоднення, призводить до підвищення кінцевої вологості концентрату матеріалу, але позитивний ефект від застосування режиму віброкипіння є вагомим [71]. Для запобігання подібним явищам застосовується додаткове статичне притискання, що прикладається до верхньої поверхні порції, а також зменшення амплітуди коливань вібростолу.

В цілому ж основною перешкодою для досягнення максимальної однорідності трифазного вологого дисперсного матеріалу в процесі його зневоднення є безперервне зростання густини та міцності структури, в результаті чого зменшується площа поперечного перерізу капілярів між твердими частинками [115]. Математичний аналіз розглядуваних процесів ускладнюється внаслідок того, що властивості матеріалу змінюються протягом кожного циклу навантаження [71].

З врахуванням результатів експериментальних досліджень [23, 68, 191], отриманих при віброударному зневодненні різних вологих дисперсних матеріалів та на підставі теоретичного аналізу моделей даних процесів, можна зробити висновок, що інтенсивність видалення рідини є величиною змінною – найбільшою на початку процесу й найнижчою в момент його завершення [71]. Останнє пояснюється тим, що в ході зневоднення підвищується величина сумарної площі контакту частинок твердої фази в одиниці об'єму порції матеріалу і ефективність віброударних впливів зменшується. З іншої сторони тривалість процесу зневоднення до забезпечення заданої кінцевої вологості U_k порції зростає при збільшенні її висоти H_m (див. рисунок 4.1) [71].

Хід процесу видалення рідини значною мірою залежить й від гранулометричного складу та найбільших розмірів частинок твердої фази. При великій початковій вологості U_n вологого дисперсного матеріалу буде зменшуватись ступінь їх ущільнення, що також приводить до збільшення часу процесу зневоднення [71].

В рідинних та газових високодисперсних системах внаслідок наявності між фазами значної за площею активної поверхні контакту,

зростає величина вільної поверхневої енергії, а отже підвищується роль молекулярних сил зчеплення та відштовхування між частинками. В результаті з останніх утворюються окремі агрегати та просторові структури [43]. Тому масообмінні процеси в таких системах протікають при достатньо інтенсивних віброударних впливах [71].

Міцність зв'язків (контактів) між частинками твердої фази залежить від фізико-хімічної природи їх поверхні. Згідно із результатами аналізу фізико-хімічного стану розглядуваних вологих дисперсних матеріалів, вони відносяться до структур з коагуляційними контактами [43] між твердими частинками, розділених шарами рідинної фази, рівноважна фіксована товщина яких відповідає мінімуму вільної поверхневої енергії. Міцність зчеплення частинок у коагуляційному контакті $F_k = 1 \text{ нН} - 10 \text{ Н}$. Контакти характеризуються повною оборотністю, тобто міцність їх після порушення відновлюється практично до початкового значення [71]. Тим більш важливо забезпечити, при зневодненні розглядуваних матеріалів періодичне, з високою частотою та з невеликими витратами енергії і часу руйнування коагуляційних контактів. Отже віброударне інерційне навантаження і в цьому плані виявляється найбільш ефективним.

Серед сукупності властивостей вологих дисперсних матеріалів дуже важливими є їх структурно-механічні (реологічні) властивості, що в найбільшій мірі змінюються в результаті механічних і особливо віброударних впливів, при достатній інтенсивності останніх. Наприклад, при зміні швидкості деформації, ці властивості (в'язкість, пружні і релаксаційні характеристики), можуть змінюватися в мільйони разів. А це, в свою чергу означає, що методи, основані на вивченні структурно-реологічних властивостей дисперсних систем безпосередньо в умовах віброударних впливів, і є тим інструментом, який дозволить визначити їх оптимальні параметри в умовах безпосереднього здійснення масообмінних технологічних процесів. Зокрема, параметри впливів, що забезпечують граничне руйнування структури, для досягнення максимально однорідного розподілу фаз та підвищення площі активної поверхні розділу між ними.

Узагальнюючи сказане вище, можна стверджувати, що з позицій фізико-хімічної механіки основним видом найбільш ефективних універсальних механічних впливів на вологі дисперсні матеріали є віброударне інерційне навантаження.

Таким чином, під оптимальними параметрами віброударного зневоднення слід розуміти такі їх значення, при яких складна за сукупністю реологічних властивостей система переходить в простішу, а у граничному випадку - в найбільш просту ньютонівську систему, з найменшим рівнем в'язкості [192]. В результаті цього її реологічний опір при зміні форми або об'єму зменшується до мінімуму.

При коливаннях виконавчих елементів гідроімпульсного вібропреса до руху може залучатися вся маса порції матеріалу, що зневоднюється або

тільки її частина, якщо товщина шару є дуже великою. При цьому чим далі від поверхні виконавчого елемента знаходиться розглядуваний моношар порції, тим меншою буде амплітуда періодичної складової його руху (див. пункт 1.2.3). Зсуви за фазою при переміщенні суміжних моношарів обумовлюють періодичні стискання і розрідження всієї маси порції.

При вібраційному та віброударному навантаженні істотно знижується в'язкість рідинної фази матеріалу, що сприяє швидшому та легшому її видаленню з прес-форми. Крім цього, зменшується нерівномірність значень інших фізико-механічних параметрів матеріалу по об'єму прес-форми. Так, за результатами експериментів [43], швидкість перерозподілення твердих частинок основи під час віброзамішування на декілька порядків вища, ніж в ході аналогічного процесу, але реалізованого без накладання вібрацій. Фактично швидкість перерозподілення твердих частинок вологого дисперсного матеріалу є одним з основних критеріїв ефективності різних способів зневоднення, оскільки при достатньо великих її значеннях забезпечується інтенсивне зменшення об'єму порції і рівномірне укладання в ньому твердих частинок, з витисканням рідини назовні [142]. При цьому слід очікувати вищої інтенсивності видалення рідини в процесах віброударного зневоднення, завдяки найбільшим величинам прискорень виконавчих елементів гідроімпульсного обладнання. Вказана інтенсифікація дозволить зробити процес зневоднення безперервним і значно менш енергоємним. Зменшаться й опори при русі рідинної фази через фільтрувальні отвори прес-форми, оскільки останні будуть періодично самоочищатись і менше забиватись твердими частинками.

Для зневоднення вологих дисперсних матеріалів способом віброударного навантаження потрібні значно менші тиски, ніж наприклад, під час статичного пресування [23]. З'являється можливість застосування полегшеного і дешевшого технологічного оснащення (прес-форми та фільтрів). В умовах віброударних впливів на матеріал буде також полегшено видалення з нього газової фази, яка виходитиме у вигляді бульбашок по каналах між твердими частинками.

В процесі віброударного інерційного навантаження вологих дисперсних матеріалів в першу чергу руйнуватимуться найбільш слабкі зв'язки між твердими частинками з утворенням нової структури міцніших зв'язків. При цьому вказане збільшення міцності та в'язкості структури матеріалів зі зменшенням їх вологості буде відбуватись дедалі інтенсивніше. В решті решт система стане необроблюваною.

Оскільки процес зневоднення супроводжується відокремленням рідинної фази, то при цьому відбувається зміна не тільки об'єму порції матеріалу, що знаходиться у прес-формі, але й її маси та фазового складу.

Найбільша рухомість та найменша в'язкість вологих дисперсних матеріалів відповідають граничному руйнуванню їх структури. А оскільки

ступінь руйнування та ефективна в'язкість матеріалів визначаються величиною відносної швидкості деформування (швидкості зсуву) $\dot{\gamma}$ відносно осей x , y (див. рисунок 4.1), то для реалізації високопродуктивного та досить повного зневоднення, потрібно у всьому об'ємі порції здійснити зсув зі швидкістю

$$\dot{\gamma} \geq \dot{\gamma}_m; \dot{\gamma} \geq \dot{\gamma}_m, \quad (4.3)$$

де $\dot{\gamma}_m, \dot{\gamma}_m$ - граничні швидкості зсуву частинок, при яких починається процес текучості матеріалу відносно осей x , y .

Розглянемо докладніше, як змінюються навантаження порції матеріалу під час його попереднього віброударного зневоднення у прес-формі закритого типу (див. рисунок 4.1) [5] на різних етапах циклу спрацьовування ГП гідроімпульсного вібропреса (див. рисунок 3.3) і те, як при цьому переміщуються частинки матеріалу. Це дозволить нам розкрити механізм досліджуваних процесів, здійснити його моделювання, а також теоретично пояснити доведену у підрозділі 2.1 високу ефективність запропонованих способу та обладнання.

Цикл спрацьовування ГП з вібробуджувачем «на вході» [64], що пропонується використовувати у гідроімпульсному вібропресі для попереднього віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів у прес-формі закритого типу (див. рисунок 4.1), можна поділити на чотири етапи [5, 166].

На I-му етапі відкривається вібробуджувач і тиск робочої рідини у порожнині гідроциліндра ГП різко збільшується, в результаті чого виконавчі елементи масами m_I, m_{II} , а також порція матеріалу у прес-формі швидко зміщуються вгору. При цьому стискаються пружини c_y , а матеріал піддається інерційному та статичному P_{cm} навантаженню з боку пуансона. Зусилля $F_{mzI}(t)$, $F_{mzII}(t)$, $F_{mx\Sigma}(t)$, $F_{my\Sigma}(t)$, що діють на частинки матеріалу відносно осей z , x , y на початку даного етапу є максимальними. $F_{mzI}(t)$ спрямована вгору, $F_{mzII}(t)$ – вниз, $F_{mx\Sigma}(t)$ та $F_{my\Sigma}(t)$ – від осі прес-форми до її стінок. Під впливом даних зусиль рідинна фаза матеріалу витискається через отвори прес-форми d_o назовні.

На II-му етапі вібробуджувач закривається, тиск у порожнині гідроциліндра ГП починає падати, але виконавчі елементи m_I, m_{II} та порція матеріалу m_m продовжують по інерції рух вгору. Величини сил $F_{mzI}(t)$, $F_{mzII}(t)$, $F_{mx\Sigma}(t)$, $F_{my\Sigma}(t)$ поступово зменшуються, але напрямок їх залишається таким самим, як і на I-му етапі, отже процес зневоднення триває.

На III-му етапі при закритому вібробуджувачі маси m_I, m_{II}, m_m під впливом сил тяжіння, сил пружності пружин c_y та зусилля P_{cm} здійснюють переміщення з граничного верхнього у граничне нижнє положення. Порція матеріалу частково розвантажується; $F_{mzI}(t)$ та $F_{mzII}(t)$ спрямовані вниз,

$F_{mx\Sigma}(t)$, $F_{my\Sigma}(t)$ – від стінок прес-форми до її осі. Величини їх є мінімальними, таким чином, зневоднення матеріалу майже припиняється, але відбувається не менш важливе для кінцевого результату процесу рівномірне перерозподілення твердих частинок по об'єму прес-форми, з їх взаємними зсувами та прослизаннями і переміщенням у порожнини з меншою концентрацією твердих частинок.

На IV-му етапі віброзбуджувач все ще закритий, тиск у гідроциліндрі ГП – мінімальний. Нижній виконавчий елемент залишається нерухомим, отже $F_{mzI}(t) = 0$, а верхній виконавчий елемент завдяки силам демпфірування, що діють у середовищі порції матеріалу здійснює невеличкі вертикальні затухаючі коливання, під час яких напрямок $F_{mzII}(t)$, $F_{mx\Sigma}(t)$, $F_{my\Sigma}(t)$ періодично змінюється, а величина – поступово зменшується майже до нуля.

На рисунку 4.4 представлені схеми навантаження та руху твердих частинок порції вологого дисперсного матеріалу під час кожного з вищеописаних етапів у осьовому і поперечному перерізах прес-форми [5]. Для спрощення тверді частинки показані у вигляді кіл однакового діаметра.

Зокрема, на I-му етапі при збільшенні зусиль $F_{mzI}(t)$, $F_{mzII}(t)$, $F_{mx\Sigma}(t)$, $F_{my\Sigma}(t)$ та початку переміщення мас m_I , m_{II} , m_M вгору першими починають стискатись шари порції, що безпосередньо прилягають до днища прес-форми та пуансона (див. рисунок 4.4, а). Хвилі стискаючих напружень у середовищі порції матеріалу переміщуються від днища прес-форми вгору, а від пуансона вниз (див. рисунок 4.4, б). У середніх за висотою шарах порції дані хвилі взаємно накладаються, продовжують переміщуватись до пуансона і днища прес-форми, відбиваються від них і рухаються у протилежних напрямках, з повторенням даної послідовності багато разів [64]. Одночасно у поперечних перерізах порції від її осі до периферії і у протилежному напрямку проходять прямі та зворотні хвилі дотичних напружень (рисунок 4.4, г, д). При цьому, оскільки тверді частинки затримуються фільтрувальною сіткою, концентрація їх біля стінок прес-форми збільшується.

На II-му етапі, у зв'язку із гальмуванням виконавчих елементів, у нижніх шарах порції виникає розрідження, а від пуансона вниз відходять прямі хвилі стискаючих напружень, які відбиваються, йдуть назад, знову відбиваються і так далі, з поступовим затуханням (див. рисунок 4.4, а, б). У поперечних перерізах переміщуються прямі та зворотні хвилі дотичних напружень, також з поступовим затуханням (див. рисунок 4.4, г, д).

На III-му етапі прямі хвилі стискаючих напружень відходять тільки від пуансона, оскільки він навантажений зусиллям P_{cm} (див. рисунок 4.4, в). Хвилі відбиваються від днища прес-форми і йдуть назад. У поперечних перерізах хвилі дотичних напружень ініціюються стінками прес-форми і переміщуються до її осі (див. рисунок 4.4, е). Концентрація твердих

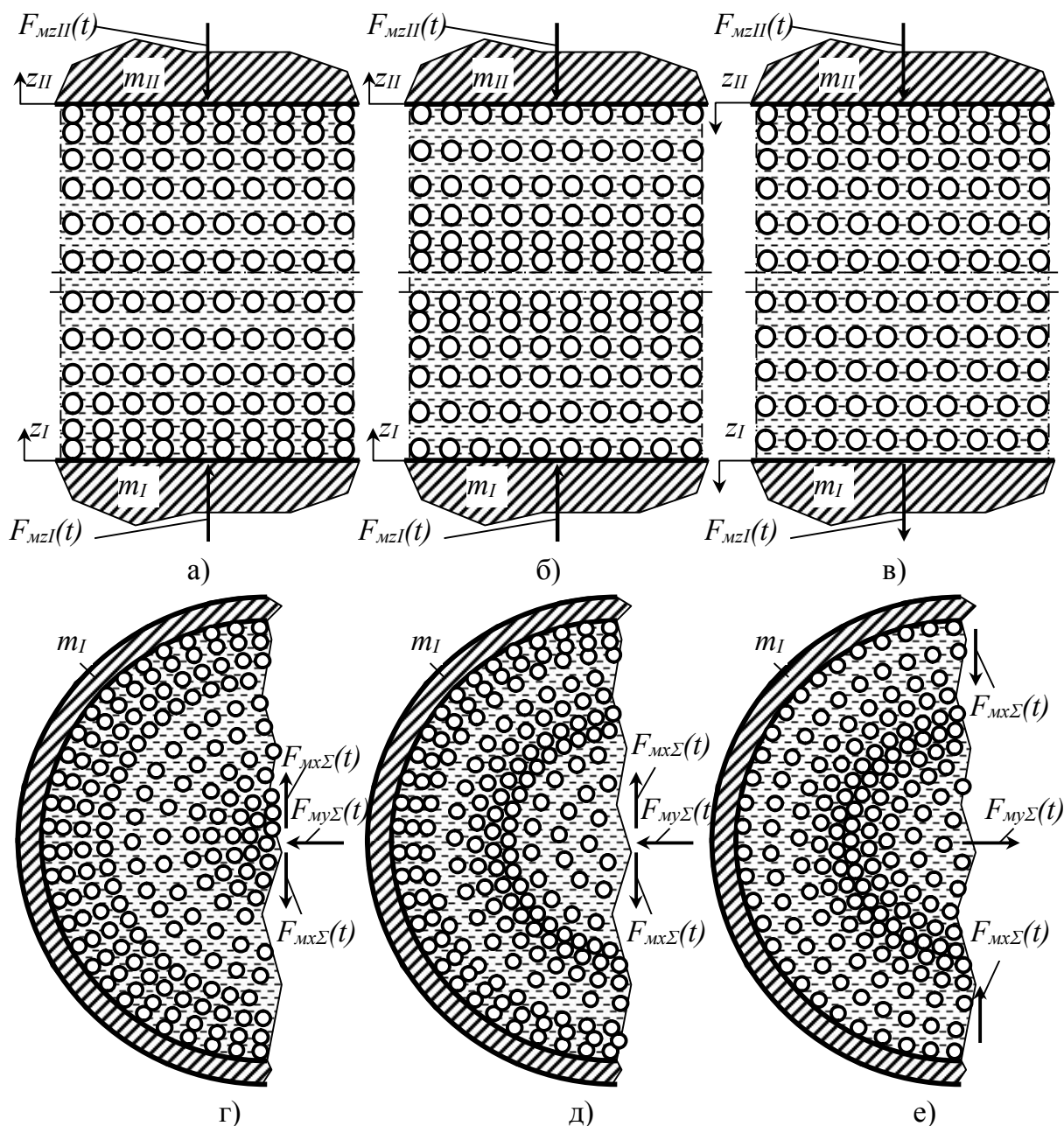


Рисунок 4.4 – Схеми навантаження та руху твердих частинок порції вологого дисперсного матеріалу під час його віброударного зневоднення на I-му (а, г), II-му (б, д), III-IV-му (в, е) етапах циклу спрацьовування ГП, у осьовому (а, б, в) та поперечному (г, д, е) перерізах прес-форми

частинок біля стінок прес-форми зменшується, можливе навіть невеличке підсмоктування через фільтрувальні отвори (які на схемах на рисунок 4.4 не показані) у середину прес-форми атмосферного повітря.

У продовж IV-го етапу (див. рисунок 4.4, в, е) при нерухомій прес-формі складова $F_{MzI}(t) = 0$, а напрямки $F_{MzII}(t)$, $F_{Mx\Sigma}(t)$, $F_{My\Sigma}(t)$ періодично змінюються на протилежний. Відбуваються періодичні незначні стискання і розрідження порції матеріалу у верхніх шарах, що створюються пуансоном і на початку етапу можуть досягати дна прес-форми і навіть

відбиватись. У поперечних перерізах (в основному у верхній частині порції) проходять малоінтенсивні прямі та зворотні хвилі дотичних напружень.

З врахуванням описаного механізму процесу попереднього віброударного зневоднення вологого дисперсного матеріалу у прес-формі закритого типу, можна перейти до розробки його реологічної моделі.

Відомі моделі харчових матеріалів при реалізації різноманітних технологічних процесів їх переробки [121, 130], зокрема: в'язко-пластична модель Шведова-Бінгама, пружно-в'язкі моделі Кельвіна та Максвела, пружно-в'язко-пластична модель Бінгама тощо – є непридатними при здійсненні досліджень процесів віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів, оскільки не відображають деякі їх важливі властивості, в тому числі, відміни фізико-механічних характеристик твердої та рідинної фаз, наявність у матеріалах вільної рідини та її взаємодію з твердою фазою.

На рисунку 4.5 представлені розроблені нами безінерційні реологічні моделі вологого дисперсного матеріалу під час його віброударного інерційного навантаження на I-му та II-му етапах циклу спрацьовування ГП [5, 187, 193]. На моделях, окрім вищевказаних позначені такі параметри: $c_{mx}, c_{my}, c_{mz}, c_{px}, c_{py}, c_{pz}$ - коефіцієнти жорсткості твердої та рідинної частинок оброблюваного матеріалу відносно осей x, y, z , [Н/м]; $\alpha_{mx}, \alpha_{my}, \alpha_{mz}, \alpha_{px}, \alpha_{py}, \alpha_{pz}$ - коефіцієнти в'язкості твердої та рідинної частинок при їх переміщенні відносно осей x, y, z , [Н·с/м]; $\tau_{0x}, \tau_{0y}, \sigma_{0z}$ – межі текучості твердої частинки відносно осей x, y, z , [Н] [43]. Таким чином, модель враховує опори як між твердими, так і між рідинними частинками порції. Останніми ми будемо називати рідину, що знаходиться у каналах між

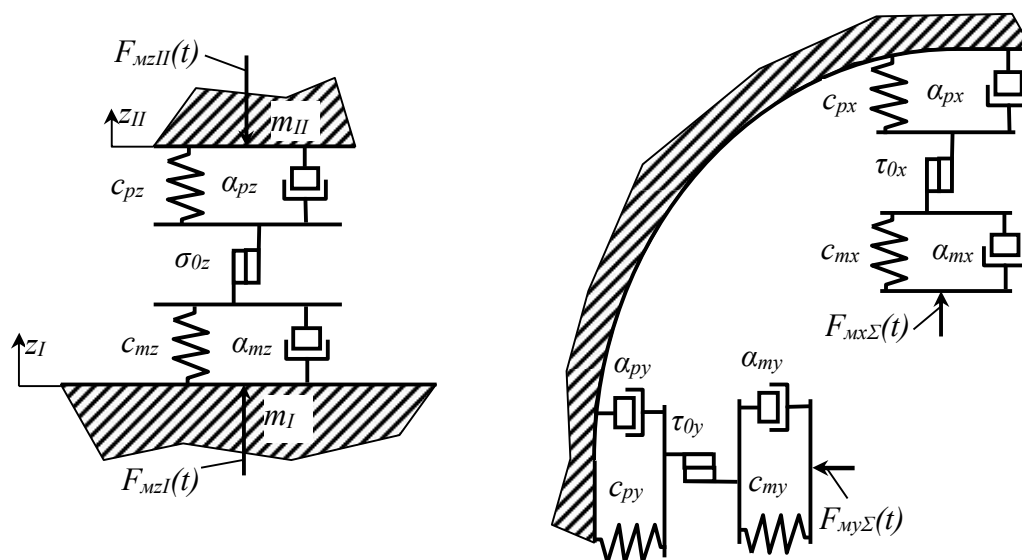


Рисунок 4.5 – Безінерційні реологічні моделі вологого дисперсного матеріалу в процесі його віброударного інерційного навантаження на I-му та II-му етапах циклу спрацьовування ГП

двома найближчими твердими частинками порції.

На початку i -го циклу віброударного інерційного навантаження порції матеріалу у прес-формі, при зближенні твердих частинок починається їх стискання та переміщення з в'язким тертям у рідинній фазі (коефіцієнти c_m, α_m), а при подальшому збільшенні навантаження і перевищення межі τ_0 (σ_0) – пластична деформація твердих частинок. Оскільки пружні і пластичні деформації твердої фази будуть відрізнятися за величиною, в даному випадку має бути використане послідовне сполучення відповідних елементів [43, 193]. Нарешті, на завершальній стадії збільшення навантажень, після завершення деформації твердих частинок порції, відбувається стискання рідинної фази (коефіцієнти c_p, α_p).

Міжмолекулярні взаємодії рідинних частинок, що характеризуються коефіцієнтами a і b (див. формули (4.1)), а при стисканні порції в середині її об'єму будуть діяти в основному сили відштовхування, - у моделях на рисунку 4.5 не враховані через значну величину цих сил у порівнянні із зусиллями $F_{mzI}(t), F_{mzII}(t)$. У додатку А наведений розрахунок результуючого максимального зусилля $F_{mz\Sigma max} = F_{mzI max} + F_{mzII max}$, що діє на частинки порції вологого дисперсного матеріалу у прес-формі при його зневодненні на експериментальному гідроімпульсному стенді, створеному на базі вібропреса ІВІМ-16 [23] (див. рисунок 6.1 та таблицю 2.1). Значення цього зусилля є на декілька порядків меншим сил міжмолекулярного відштовхування, обчислених за формулою (4.1). До цього ж при стисканні порції частина рідинної фази виливається через фільтрувальні отвори прес-форми назовні, таким чином, тиск $\Delta p_m(t)$ у середовищі матеріалу (див. підрозділ 4.3) не може бути занадто великим. Отже, нехтування міжмолекулярними взаємодіями під час складання представлених на рисунку 4.5 реологічних моделей є цілком виправданим.

На підставі даних моделей та з врахуванням формул (1.1) складаємо систему реологічних рівнянь зміни дотичних і стискаючих напружень, а також деформацій порції оброблюваного матеріалу у продовж i -го циклу його віброударного інерційного навантаження, у прес-формі, на I-му та II-му етапах циклу спрацьовування ГІІ тривалістю відповідно t_I і t_{II} (див. підрозділ 4.2), відносно осей x, y, z [5, 187, 193]

$$\begin{cases} \tau_{m.np} + \tau_{m.в.m} = \tau_{m.тек} = \tau_{p.np} + \tau_{p.в.m}; \\ x_{\Sigma} = x_m + x_p; \end{cases} \quad 0 \leq t \leq t_I + t_{II};$$

$$\begin{cases} \tau_{m.np} + \tau_{m.в.m} = \tau_{m.тек} = \tau_{p.np} + \tau_{p.в.m}; \\ y_{\Sigma} = y_m + y_p; \end{cases} \quad 0 \leq t \leq t_I + t_{II};$$

$$\begin{cases} \sigma_{m.np} + \sigma_{m.v.m} = \sigma_{m.tek} = \sigma_{p.np} + \sigma_{p.v.m}; \\ z_{\Sigma} = z_m + z_p, \end{cases} \quad 0 \leq t \leq t_I + t_{II}; \quad (4.4)$$

Де $\tau_{m.np}$, $\tau_{m.v.m}$, $\tau_{m.tek}$, $\tau_{p.np}$, $\tau_{p.v.m}$, $\sigma_{m.np}$, $\sigma_{m.v.m}$, $\sigma_{m.tek}$, $\sigma_{p.np}$, $\sigma_{p.v.m}$ – дотичні та стискаючі напруження, створювані силами пружності та силами в'язкого тертя твердих частинок матеріалу, дотичні і стискаючі напруження їх текучості, а також дотичні та стискаючі напруження, створювані силами пружності і силами в'язкого тертя рідинних частинок [193]; x_{Σ} , y_{Σ} , z_{Σ} , x_m , y_m , z_m , x_p , y_p , z_p – сумарні деформації порції оброблюваного матеріалу у продовж i -го циклу віброударного навантаження відносно осей x , y , z ; деформації за цей же час твердої та рідинної фаз порції відносно осей x , y , z .

У верхніх рівняннях кожної з систем (4.4) прирівнюються напруження послідовно з'єднаних груп елементів опору, при цьому у першій і третій за порядком групах напруження паралельно сполучених елементів додаються (див. пункт 1.2.1). У нижніх рівняннях кожної з систем (4.4) сумарні деформації порції оброблюваного матеріалу визначаються як суми деформацій послідовно з'єднаних груп елементів опору [43].

Системи (4.4) перетворюються далі до вигляду [187, 193]

$$\begin{cases} \frac{c_{mx}x_{m.np} + \alpha_{mx}\dot{x}_m}{S_m} = \frac{\sigma_{0x}}{S_m} = \frac{c_{px}x_p + \alpha_{px}\dot{x}_p}{S_m}; \\ x_I - x_{II} = 0 = x_{m.nl} + x_{m.np} + x_p; \end{cases} \quad 0 \leq t \leq t_I + t_{II};$$

$$\begin{cases} \frac{c_{my}y_{m.np} + \alpha_{my}\dot{y}_m}{S_m} = \frac{\sigma_{0y}}{S_m} = \frac{c_{py}y_p + \alpha_{py}\dot{y}_p}{S_m}; \\ y_I - y_{II} = 0 = y_{m.nl} + y_{m.np} + y_p; \end{cases} \quad 0 \leq t \leq t_I + t_{II}; \quad (4.5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{c_{mz}z_{m.np} + \alpha_{mz}\mathcal{E}_m}{S_M} = \frac{\sigma_{0z}}{S_M} = \frac{c_{pz}z_p + \alpha_{pz}\mathcal{E}_p}{S_M}, \\ z_I - z_{II} = z_{m.nl} + z_{m.np} + z_p; \end{array} \right. \quad 0 \leq t \leq t_I + t_{II};$$

де $x_{m.nl}$, $x_{m.np}$, $y_{m.nl}$, $y_{m.np}$, $z_{m.nl}$, $z_{m.np}$ – пластичні та пружні деформації твердої фази порції відносно осей x , y , z ; S_M – площа поперечного перерізу порції (відповідає площі пуансона).

Помножаючи всі частини верхніх рівнянь кожної з систем (4.5) на S_M і здійснюючи певні перетворення, остаточно отримуємо [187, 193]

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{px}x_p + \alpha_{px}\mathcal{E}_p - c_{mx}x_{m.np} - \alpha_{mx}\mathcal{E}_m - \tau_{0x} = 0; \\ x_{m.nl} + x_{m.np} + x_p = 0; \end{array} \right. \quad 0 \leq t \leq t_I + t_{II};$$

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{py}y_p + \alpha_{py}\mathcal{E}_p - c_{my}y_{m.np} - \alpha_{my}\mathcal{E}_m - \tau_{0y} = 0; \\ y_{m.nl} + y_{m.np} + y_p = 0; \end{array} \right. \quad 0 \leq t \leq t_I + t_{II}; \quad (4.6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{pz}z_p + \alpha_{pz}\mathcal{E}_p - c_{mz}z_{m.np} - \alpha_{mz}\mathcal{E}_m - \sigma_{0z} = 0; \\ z_I - z_{II} = z_{m.nl} + z_{m.np} + z_p. \end{array} \right. \quad 0 \leq t \leq t_I + t_{II};$$

Підставляючи у рівняння (4.6) значення z_I , z_{II} , x_m , y_m , z_m , x_p , y_p , z_p (див. підрозділ 4.2) можна визначити пластичні $x_{m.nl}$, $y_{m.nl}$, $z_{m.nl}$ і пружні $x_{m.np}$, $y_{m.np}$, $z_{m.np}$ деформації твердої фази.

На рисунку 4.6 наведена залежність напружень від деформацій у середовищі вологого дисперсного матеріалу під час його навантаження [193]. На графіку можна виділити: ділянку I, що дозволяє визначити напруження під час пружної деформації і в'язкого тертя твердих частинок; ділянку II, яка характеризує напруження, що є результатом пластичної деформації частинок твердої фази; ділянку III, що характеризує зміну дотичних та стискаючих напружень у рідинній фазі порції оброблюваного матеріалу, обумовлених її пружною деформацією та в'язким тертям.

На ефективність процесів зневоднення при використанні механічних способів найбільше впливає швидкість передачі енергії від виконавчих елементів обладнання частинкам оброблюваного матеріалу під час

витискання його через фільтрувальні отвори. Від цього залежить ймовірність руйнування структурних і фізико-механічних зв'язків між частинками рідинної та твердої фаз, а отже й ступінь зневоднення останньої, що характеризується кінцевою вологістю оброблюваного матеріалу U_k (див. пункт 1.2.1). Мірою швидкості передачі енергії є потужність N_3 , яку можна визначити як добуток максимального зусилля $F_{mz\Sigma max}$, створюваного виконавчими елементами обладнання на частинках порції, на максимальну швидкість їх переміщення, що при цьому забезпечується. Швидкість руху частинок наближено відповідає швидкості переміщення виконавчого елемента (під час попереднього віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів максимальна швидкість v_{In} переміщення нижнього виконавчого елемента гідроімпульсного обладнання – вібростолу забезпечується у момент часу $t = t_n + t_{il}$ I-го етапу циклу спрацьовування ГІП [64] (див. підрозділ 5.3)). Отже потужність, що витрачається на віброударне зневоднення можна наближено обчислити як [5]

$$N_3 = F_{mz\Sigma max} v_{In}. \quad (4.7)$$

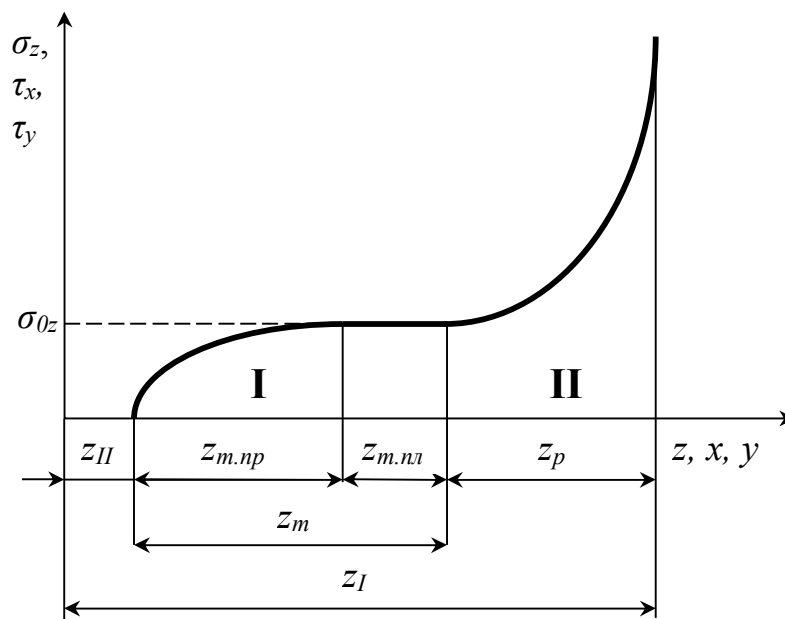


Рисунок 4.6 – Залежність напружень від деформацій у середовищі вологого дисперсного матеріалу під час його віброударного інерційного навантаження

При цьому швидкість v_{In} наближено розраховується за формулою [5]

$$v_{In} = \sqrt{2 \cdot a_I z_{Ia}}, \quad (4.8)$$

де a_I – прискорення, з яким переміщується нижній виконавчий елемент гідроімпульсного вібропреса; z_{Ia} – амплітуда коливань нижнього виконавчого елемента (див. підрозділ 5.3).

У додатку А наведені розрахунок і порівняння N_z під час зневоднення вологих дисперсних матеріалів на статичному гідравлічному пресі та на експериментальному гідроімпульсному стенді, показаному на рисунку 6.1. За результатами розрахунку можна зробити такий висновок: незважаючи на те, що під час статичного пресування матеріалів на їх частинках створюються зусилля у 40 разів більші, ніж при віброударному зневодненні (а це вимагає і відповідного збільшення енерговитрат), швидкість передачі енергії частинкам при реалізації пропонованого способу є в 3 рази вищою. У тій же самій мірі збільшується й ефективність зневоднення. При відтисканні оброблюваного матеріалу до стінок прес-форми (див. рисунок 4.4, г, д) з прискореннями, що дорівнюють прискоренням виконавчих елементів гідроімпульсного обладнання, тобто $(8...10) \cdot g$ (див. даний підрозділ вище) та різкому гальмуванню твердих частинок фільтрувальною сіткою імовірність руйнування їх структурних та фізико-механічних зв'язків з рідинними частинками, що продовжують рух з тими самими прискореннями є дуже високою. При тій же самій масі частинок і десяти – двадцятиразовому збільшенні їх прискорень забезпечується адекватне зростання сил інерції, під впливом яких, в основному і відбувається процес віброударного зневоднення.

До цього ж, в результаті проходження у середовищі порції оброблюваного матеріалу в процесі його віброударного інерційного навантаження хвиль дотичних та стискаючих прямих і зворотних деформацій та напружень, забезпечується періодичне перерозподілення твердих частинок по об'єму прес-форми з їх поворотами, взаємними зсувами, прослизаннями та більш щільним укладанням, що також сприяє кращому, ніж при статичному пресуванні видаленню з проміжків між частинками твердої фази рідини. У порівнянні з віброударним пресуванням сухих порошкових матеріалів [64] описаний процес ущільнення порції вологого дисперсного матеріалу буде відбуватись навіть ефективніше, оскільки під час його віброударного навантаження тверді частинки постійно занурені у рідинну фазу, отже на них діють сили виштовхування, що також підвищує рухомість твердої фази. Крім цього, завдяки рідинним прошаркам зменшується величина сил тертя між твердими частинками.

З врахуванням всього вищевикладеного у даному підрозділі, високу ефективність пропонованих способу віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів та гідроімпульсного обладнання для його реалізації можна вважати теоретично обґрунтованою.

4.2 Моделювання процесів віброударного зневоднення

Для установлення залежностей, що зв'язують параметри навантаження під час попереднього віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів на гідроімпульсному вібропресі (максимальний тиск $p_{c.max}$ у порожнині гідроциліндра ГП, амплітуду z_{Ia} і частоту ν коливань його нижнього виконавчого елемента – вібростолу) [166, 167] (див. також пункт 2.2.2), робочі параметри досліджуваних процесів (переміщення z_I, z_{II} (див. рисунок 4.1), швидкості \dot{z}_I, \dot{z}_{II} та прискорення $\ddot{z}_I, \ddot{z}_{II}$ виконавчих елементів вібропреса, а також частинок рідинної і твердої фаз оброблюваного матеріалу відносно трьох осей координат (див. підрозділ 4.1), зусилля $F_{mx\Sigma}(t), F_{my\Sigma}(t), F_{mz\Sigma}(t)$, створювані на частинках порції відносно трьох осей координат, тиск $\Delta p_m(t)$, що створюється у середовищі матеріалу, та тиск $\Delta p_z(t)$, під впливом якого рідинна фаза витікає з прес-форми) та фізико-механічні характеристики оброблюваного матеріалу (вологість, густину, коефіцієнти в'язкості, пружності, пластичності, масу та розміри частинок), потрібно провести математичний аналіз взаємодії останніх між собою та з виконавчими елементами вібропреса [5, 166]. Вказаний аналіз слід здійснювати з позицій механіки, гідравліки та реології. При цьому за допомогою методів механіки описується взаємодія виконавчих елементів з оброблюваним матеріалом, як механічним об'єктом, тоді як гідравліка і реологія дозволяють змоделювати внутрішні процеси у його середовищі [5, 71].

Параметри оброблюваного матеріалу, виконавчих елементів гідроімпульсного вібропреса, взаємодія у різних напрямках напружень та деформацій можуть бути достатньо точно відображені на відповідних динамічних моделях, що при необхідності розробляються для окремих етапів циклу спрацьовування ГП вібропреса (на кожному етапі змінюється величина рушійних сил та сил демпфірування, а для деяких з них й напрямок дії), для кожної фази матеріалу (твердих частинок, рідини або газу), а також для різних ділянок порції. Наприклад, на ділянках порції перед фронтом хвилі напружень концентрація твердих частинок є більшою, а вологість – меншою (див. рисунок 4.4). Те ж саме можна сказати і про ділянки біля стінок прес-форми під час переміщення виконавчих елементів гідроімпульсного вібропреса вгору (див. рисунок 4.4). При цьому застосовуються умовні позначення зведених мас, пружних, пластичних та в'язких елементів [43, 64]. За допомогою клинового елемента можна відтворювати ущільнення твердих частинок оброблюваного матеріалу; для відображення деформації у взаємно-перпендикулярних напрямках використовуються передавальні відношення $i_{x,y,z}$.

У зв'язку із складністю аналізу динамічних та математичних моделей, що враховують достатньо великий перелік факторів та

параметрів розглядуваних системи та процесу при визначенні оптимальних режимів навантаження вологих дисперсних матеріалів, для спрощення досліджень та забезпечення можливості створення у подальшому інженерної практично придатної методики проектного розрахунку конструктивних параметрів гідроімпульсного обладнання для віброударного зневоднення, потрібно прийняти ряд припущень.

Як було обґрунтовано у підрозділі 4.1 (див. також додаток А), сили міжмолекулярної взаємодії частинок твердої та рідинної фаз порції вологого дисперсного матеріалу, що піддається зневодненню враховувати недоцільно. Для обґрунтування даного припущення окрім вищевказаних слід взяти до уваги і такі міркування.

Тверді частинки практично у продовж всього процесу зневоднення розділені рідинними каналами. У попередньому підрозділі було встановлено, що під час реалізації віброударного інерційного навантаження порції вологого дисперсного матеріалу у прес-формі закритого типу, частинки матеріалу періодично й рівномірно перерозподіляються по її об'єму. У зв'язку із цим, можна припустити, що в ході зневоднення, в міру зближення та ущільнення твердих частинок, площа поперечного перерізу рідинних каналів між ними зменшується приблизно однаково у всій порції. Таким чином, під час всього досліджуваного процесу тверді частинки будуть відокремлені одна від одної шарами рідинної фази (відстані між центрами мас їх молекул будуть значно більшими значень 10^{-9} - 10^{-10} м, на яких починається міжмолекулярна взаємодія, див. підрозділ 4.1). Після видалення з каналів скелету основи всієї рідини, що має з ним зв'язки структурного та фізико-механічного характеру (якщо вдасться забезпечити такий ступінь попереднього зневоднення), віброударне навантаження порції потрібно припинити, оскільки в іншому випадку розпочнеться процес руйнування твердих частинок. Останнє, у свою чергу, призведе до додаткових витрат енергії та часу при остаточному зневодненні вологих дисперсних матеріалів (див. підрозділ 4.1) і підвищення їх кінцевої вологості U_k . Тому при проведенні динамічного аналізу сили взаємного притягнення та відштовхування частинок твердої фази можна не враховувати.

Що стосується частинок рідини, то ті з них, які мають зі скелетом основи зв'язки фізико-механічного та структурного типу (вільна рідина) [45], будуть в процесі віброударного навантаження і збільшення тиску в середовищі відокремлюватись, рухатись по каналах в сторону отворів у бокових стінках прес-форми і через останні витискатись назовні. Відокремлення способом віброударного навантаження адсорбованої (зв'язаної) рідини є, в принципі, можливим, але досить енергоємним, низькопродуктивним процесом (див. пункт 1.2.1), недоцільним в умовах потокового виробництва. Хімічно зв'язана рідина порції видаляється також

при цьому не буде, отже взаємодію молекул рідинних та твердих частинок ми так само не беремо до уваги.

Сили міжмолекулярної взаємодії рідинних частинок ми не враховуємо через їх значну величину у порівнянні із зусиллями навантаження (див. підрозділ 4.1 та додаток А) та демпфірування.

З врахуванням вищевикладених припущень та на підставі моделей на рисунку 4.5 розроблені динамічні моделі частинок твердої та рідинної фаз порції вологого дисперсного матеріалу в процесі його попереднього віброударного зневоднення у прес-формі [160], показані на рисунку 4.7. На моделях, окрім вказаних у підрозділі 4.1 позначені такі параметри:

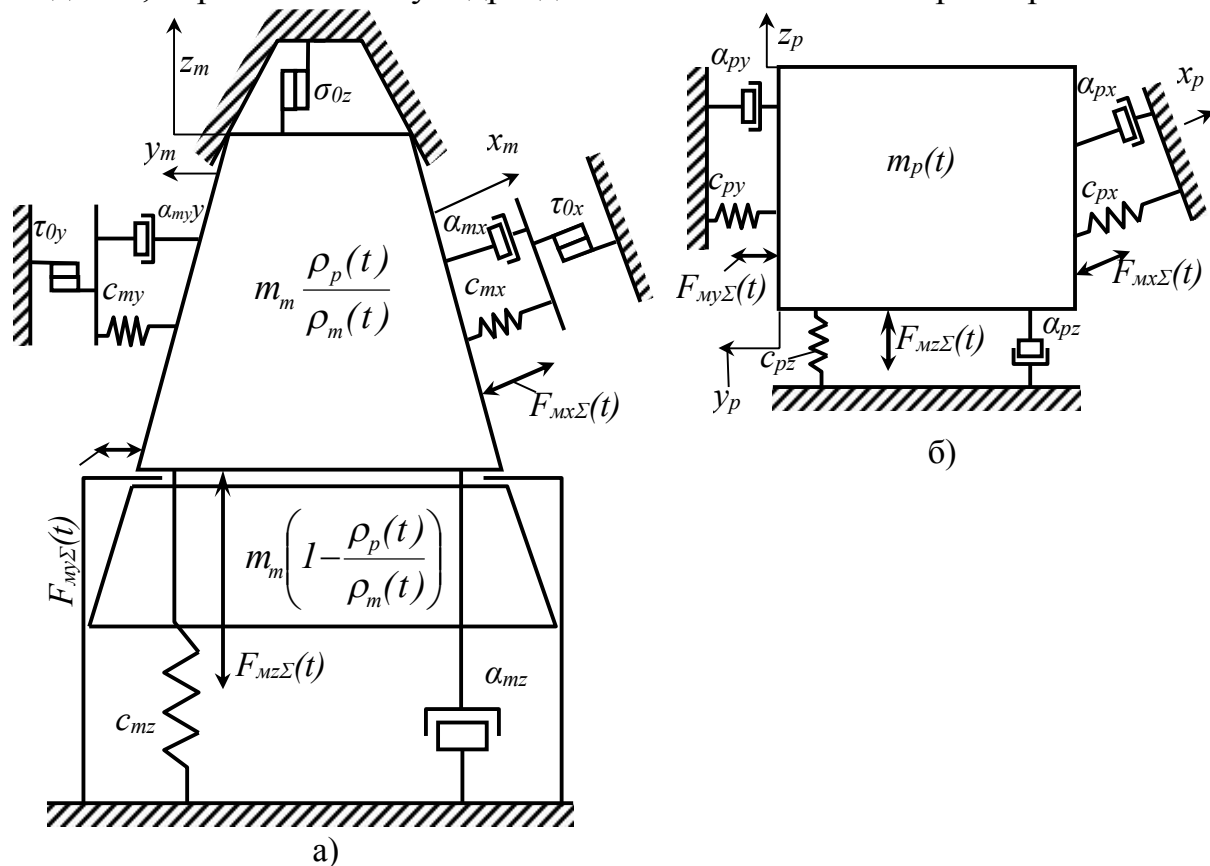


Рисунок 4.7 – Динамічні моделі руху частинок твердої (а) та рідинної (б) фаз порції вологого дисперсного матеріалу в процесі його попереднього віброударного зневоднення у прес-формі закритого типу

m_m – маса твердої частинки оброблюваного матеріалу у повітрі;

$m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)}$ - маса тої же самої твердої частинки при її переміщенні в

об'ємі порції вологого дисперсного матеріалу під час віброударного зневоднення у прес-формі (є меншою m_m , оскільки тверда частинка переміщується у рідинному середовищі й на неї діє виштовхувальна сила Архімеда [188]);

$\rho_m(t), \rho_p(t)$ – поточні значення густини твердої та рідинної фаз порції матеріалу; $m_m \left(1 - \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} \right)$ – зменшення маси твердої частинки у порівнянні із масою m_m , яке обумовлене впливом виштовхувальної сили (на рисунку 4.7, 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);

$m_p(t)$ – маса частинки рідинної фази матеріалу (маса рідини, що знаходиться у каналі між двома найближчими твердими частинками); $x_m, y_m, z_m, x_p, y_p, z_p$ – переміщення мас $m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)}$ та $m_p(t)$ відносно осей координат x, y, z .

Як відомо, в'язкість, в тому числі і вологих дисперсних матеріалів, залежить, головним чином, від температури і тиску у їх середовищі [154]. Зміною температури у продовж кожного циклу віброударного навантаження нехтуємо, а тиск за цей же самий період, як це буде показано далі у даному підрозділі, практично миттєво збільшується від нуля до максимуму $\Delta p_{m,max}$, величина якого, виходячи із визначеного у додатку А значення $F_{mz\Sigma max}$ та площі S_m поперечного перерізу порції матеріалу, складає біля 1 МПа (див. додаток Б та таблицю Г.2). За таких умов, згідно із зміну коефіцієнтів в'язкості можна також не враховувати.

Під час моделювання руху частинок твердої та рідинної фаз порції вологого дисперсного матеріалу в процесі його попереднього віброударного зневоднення на гідроімпульсному вібропресі, робочий цикл останнього ділимо на ті ж самі чотири етапи, що були описані у підрозділі 4.1 [5].

Силовий імпульсний вплив на частинки порції вологого дисперсного матеріалу з боку виконавчих елементів ГПП відносно осей x, y (див. підрозділ 4.1) можна визначити як добуток $F_{mz\Sigma}(t)$ на коефіцієнт k_f передачі зусилля [158]

$$F_{mx\Sigma}(t) = F_{mz\Sigma}(t) \cdot k_f; \quad F_{my\Sigma}(t) = F_{mz\Sigma}(t) \cdot k_f; \quad 0 < t \leq T_u. \quad (4.9)$$

У зв'язку із тим, що вміст твердої фази у порції матеріалу, що зневоднюється на гідроімпульсному вібропресі, складає 20 – 25% (див. підрозділ 3.1), можна вважати, що за своїми властивостями він наближаються до ньютонівських рідин. Тому тиск, створюваний у порції відносно осі координат z , практично без змін передається по осях x і y . Отже значення k_f орієнтовно може бути прийнятим рівним 0,9.

На рисунку 4.8 показані схеми силового навантаження частинок порції вологого дисперсного матеріалу та виконавчих елементів гідроімпульсного вібропреса в процесі віброударного зневоднення на I-му - IV-му етапах циклу спрацьовування ГПІ відносно осі z (z_1, z_2) [5]. На даних схемах позначені такі параметри:

m_I – маса нижнього виконавчого елемента гідроімпульсного вібропреса, що враховує масу вібростолу, плунжера гідроциліндра ГПІ, прес-форми, крім цього, m_I включає масу порції m_m матеріалу, що зневоднюється (див. рисунки 2.1, 3.1, 4.1 та підрозділ 4.1);

m_{II} – маса верхнього виконавчого елемента вібропреса (інерційна маса) сума мас пуансона, рухомої траверси, змінних інерційних вантажів, поршня та штока допоміжного гідроциліндра;

$\ddot{x}_I, \ddot{x}_{II}, \ddot{x}_m, \ddot{x}_p$ – поточні значення прискорень нижнього та верхнього виконавчих елементів вібропреса, твердої та рідинної частинок оброблюваного матеріалу;

P_z – зусилля, створюване на нижньому виконавчому елементі тиском $\Delta p_{y\partial II} + p_z$ робочої рідини у порожнині гідроциліндра ГПІ на I-му етапі (див. даний підрозділ нижче та підрозділ 5.3);

F_y, F_{ym}, F_{yp} – сила пружності стиснених пружин повернення вібростолу та сили пружного деформування твердої та рідинної частинок порції вологого дисперсного матеріалу у прес-формі;

$F_{v.m.I}, F_{v.m.II}$ – сили в'язкого демпфірування в ущільненнях плунжера гідроциліндра ГПІ та поршня допоміжного гідроциліндра, що діють на нижній та верхній виконавчий елементи вібропреса [64];

$F_{v.m.m}, F_{v.m.p}$ – сили в'язкого демпфірування твердої і рідинної частинок;

$F_{c.m.II}$ – сила сухого тертя в ущільненнях штока допоміжного гідроциліндра;

F_k – сила, що утримує рідинну фазу матеріалу у капілярах (див. формулу 1.4)).

Виведемо залежності для визначення основних динамічних параметрів для кожного з вказаних вище етапів [5].

I-й етап (див. рисунок 4.8, а)

Тривалість t_I I-го етапу відповідає тривалості t_o відкриття вібробуджувача ГПІ вібропреса, приєднаного за схемою «на вході» [64] у продовж циклу його спрацьовування, який, в свою чергу, згідно із [64], може бути обчислений як

$$t_o = T_u - t_{n.m}, \quad (4.10)$$

де T_y – період циклу спрацьовування вібробуджувача; $t_{н.м}$ – тривалість збільшення тиску в об'ємі ГП $W_{a.o}$, що акумулює від p_2 до p_1 [64] (див. даний підрозділ нижче та підрозділ 5.1), яку можна знайти як

$$t_{н.м} = \frac{2 \cdot E_{н.а}}{Q_{н1}(p_1 + p_2)}, \quad (4.11)$$

де $E_{н.а}$ – енергія, що накопичується у продовж II-IV-го етапів у об'ємі $W_{a.o}$, і яка передається виконавчим елементам вібропреса разом з енергією від насоса ГП з подачею $Q_{н1}$ в ході I-го етапу циклу, визначаємо за формулою [64]

$$E_{н.а} = \frac{Q_{н1} \cdot t_в (p_1 + p_2)}{2} + \frac{(p_1^2 - p_2^2) W_{a.o}}{2 \cdot K_{зв.а.о}}, \quad (4.12)$$

де $t_в$ – швидкодія вібробуджувача, що може бути знайдена як [64]

$$t_в = \frac{h_{о.з} S_{о.з}}{Q_{н1}}, \quad (4.13)$$

де $h_{о.з}$ – перекриття золотника основного каскаду вібробуджувача ГП [64]; $S_{о.з}$ – площа поперечного перерізу золотника;

За результатами наведених у [194] розрахунків для кулькового однокаскадного вібробуджувача ГП: $t_в = 3,66 \cdot 10^{-4}$ с; середнє значення $t_в$ для двокаскадних вібробуджувачів із золотниковими запірними елементами складає 10^{-3} с [64, 65].

Об'єм $W_{a.o}$ включає сталеву гідролінію довжиною $l_{0с}$ та площею прохідного перерізу $f_{0с}$, гумово-металеву гідролінію ($l_{0г.м}$, $f_{0г.м}$), акумуляторну гідролінію ($l_{г.а}$, $f_{г.а}$) та рідинний гідроакумулятор з робочим об'ємом W_a (див. рисунок 5.1 та підрозділ 5.1): $W_{a.o} = l_{0с} \cdot f_{0с} + l_{0г.м} \cdot f_{0г.м} + l_{г.а} \cdot f_{г.а} + W_a$.

Зведений модуль об'ємної пружності $K_{зв.а.о}$ об'єму $W_{a.o}$ можна підрахувати таким чином

$$K_{зв.а.о} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{г-р.а.а.ср}} + \frac{1}{K_{0с}} + \frac{1}{K_{0г.м}} + \frac{1}{K_{г.а}} + \frac{1}{K_a} \right)}, \quad (4.14)$$

де $K_{г-р.а.а.ср} = \frac{K_{г-р.а.а.1} + K_{г-р.а.а.2}}{2}$ – середня величина адіабатного модуля об'ємної пружності робочої рідини в об'ємі, що акумулює при зміні тиску від p_1 до p_2 з урахуванням вмісту нерозчиненого повітря.

Адіабатний модуль пружності для швидких процесів $K_{p.a} \approx 1,5 \cdot K_p$ [195].

Модуль об'ємної пружності газорідинної суміші [196]

$$K_{z-p} = \frac{K_p \left(\frac{W_p}{W_z} + 1 \right)}{\frac{W_p}{W_z} + K_p \frac{p_0}{p_1^2}}, \quad (4.15)$$

де K_p – модуль пружності рідини, що не містить повітря (для мастила АМГ-10, використаного як робоча рідина в гідросистемі ГП: $K_p = 1,33 \cdot 10^9$ Па [196]; W_p, W_z – відповідно, об'єми рідинної і газової фаз робочої рідини при атмосферному тиску p_0 (приймаємо 0,003% вміст нерозчиненого повітря); p_1 – максимальний тиск у гідросистемі.

У подальшому при визначенні модулів об'ємної пружності робочої рідини досліджуваного гідроімпульсного обладнання для віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів, а також модулів об'ємної пружності самих матеріалів, буде розумітись, що ці модулі є адіабатними і розраховані для газорідинних сумішей, навіть і в тому випадку, якщо це не буде зазначено у індексах даних параметрів.

Зведені модулі об'ємної пружності стінок гідроліній об'єму $W_{a.o}$ та порожнини гідроаккумулятора - $K_{0c}, K_{0zm}, K_{z.a}, K_a$ - визначаємо за такою формулою

$$K_{ze} = \frac{K_{m.z} \cdot \delta}{d}, \quad (4.16)$$

де $K_{m.z}$ – модуль об'ємної пружності матеріалу гідролінії або порожнини; δ, d – товщина її стінки та діаметр.

У подальшому під модулями об'ємної пружності гідроліній та порожнин будуть розумітись зведені модулі об'ємної пружності.

Поточні значення зусиль, що діють на порцію вологого дисперсного матеріалу з боку нижнього (F_{mzI}) та верхнього (F_{mzII}) виконавчих елементів, а також зусилля двостороннього навантаження ($F_{mz\Sigma}$) на I-му етапі спрацьовування ГП визначаємо за формулами [187]

$$F_{mzI}(t) = (\Delta p_{y\partial II} + p_3) \cdot S_z - m_I (\ddot{x}_I + g) - (\alpha_z + \alpha_{mz} + \alpha_{pz}) \times \\ \times (\ddot{x}_I - \ddot{x}_H) - c_y (z_I + z_{0y}) - (c_{mz} + c_{pz}) (z_I - z_{II}) - \sigma_{0z} - F_{\kappa};$$

$$\begin{aligned}
F_{mzII}(t) &= m_{II}(g + \alpha_{II}) + (\alpha_{\partial,z} + \alpha_{mz} + \alpha_{pz})(z_{II} - z_I) + \\
&+ (c_{mz} + c_{pz})(z_{II} - z_I) + R_{\partial,z} \text{sign}(z_{II} - z_I) + \sigma_{0z} + P_{cm} + F_{\kappa}; \\
F_{mz\Sigma}(t) &= F_{mzI}(t) + F_{mzII}(t); t_n + t_{il} < t \leq t_I,
\end{aligned} \tag{4.17}$$

де S_2 – площа поперечного перерізу плунжера гідроциліндра ГПІ; $R_{\partial,z}$ – сила сухого тертя в ущільненнях штока допоміжного гідроциліндра; $\Delta p_{y\partial II}$ – ударне збільшення тиску робочої рідини у порожнині гідроциліндра ГПІ на I-му етапі циклу його спрацьовування (див. підрозділ 5.3); t_n – тривалість проходження першої після початку I-го етапу ударної хвилі тиску робочої рідини від віброзбуджувача до порожнини гідроциліндра ГПІ (див. підрозділ 5.3); t_{il} – тривалість збільшення тиску робочої рідини у порожнині гідроциліндра ГПІ від p_3 до $\Delta p_{y\partial II} + p_3$ (див. підрозділ 5.3); p_3 – тиск робочої рідини у порожнині гідроциліндра ГПІ до відкриття віброзбуджувача – тиск, обумовлений рівнем h_6 у зливному баку [195]

$$p_3 = \rho_{p.p.t} \cdot g \cdot h_6, \tag{4.18}$$

де $\rho_{p.p.t}$ – густина робочої рідини з урахуванням середнього підвищення робочої температури Δt_p [195]

$$\rho_{p.p.t} = \frac{\rho_{p.p}}{1 + 8 \cdot 10^{-4} \Delta t_p}, \tag{4.19}$$

$\rho_{p.p}$ – густина робочої рідини при температурі 20 °С.

Рівняння руху твердої частинки матеріалу в процесі віброударного зневоднення на I-му етапі циклу (див. рисунок 4.7, а), мають вигляд [187]

$$m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} \ddot{x}_m + \alpha_{mx} \dot{x}_m + c_{mx} x_m + \tau_{0x} = F_{mz\Sigma}(t) \cdot k_f; t_n + t_{il} < t \leq t_I;$$

$$m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} \ddot{y}_m + \alpha_{my} \dot{y}_m + c_{my} y_m + \tau_{0y} = F_{mz\Sigma}(t) \cdot k_f; t_n + t_{il} < t \leq t_I;$$

$$m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} (\ddot{z}_m + g) + \alpha_{mz} \dot{z}_m + c_{mz} z_m + \sigma_{0z} = F_{mz\Sigma}(t); t_n + t_{il} < t \leq t_I.$$

Рівняння руху рідинної частинки, розташованої на початку процесу віброударного навантаження поблизу від стінки прес-форми, розроблені на основі динамічної моделі, що наведена на рисунку 4.7, б, можуть бути записані як [187]

$$\begin{aligned}
 m_p(t) \ddot{x}_p + \alpha_{px} \dot{x}_p + c_{px} x_p + F_\kappa &= F_{mz\Sigma}(t) \cdot k_f; t_n + t_{il} < t \leq t_I; \\
 m_p(t) \ddot{y}_p + \alpha_{py} \dot{y}_p + c_{py} y_p + F_\kappa &= F_{mz\Sigma}(t) \cdot k_f; t_n + t_{il} < t \leq t_I; \quad (4.20) \\
 m_p(t) (\ddot{z}_p + g) + \alpha_{pz} \dot{z}_p + c_{pz} z_p + F_\kappa &= F_{mz\Sigma}(t); t_n + t_{il} < t \leq t_I;
 \end{aligned}$$

II-й етап (див. рисунок 4.8, б)

У роботі [64] доведено, що тривалість імпульсного силового впливу на виконавчий елемент ГПІ вібропресів типу ІВПМ [65] (дана тривалість дорівнює часу t_0), не перевищує 0,18 від періоду власних коливань T системи, пов'язаної з виконавчим елементом. За таких умов силовий імпульс $P_{z,max} = S_z \cdot (p_z + \Delta p_{y\partial II})$, створюваний тиском робочої рідини на початку циклу спрацьовування ГПІ, можна розглядати як миттєвий, а подальший рух виконавчих елементів вібропреса, що він обумовлює – як вільні коливання лінійної неконсервативної системи (без врахування наявності та змін тиску $p_z(t)$ у порожнині гідроциліндра ГПІ – див. також підрозділ 5.3)). Для опису даних коливань складаються відповідні лінійні диференціальні рівняння, при цьому похибка у обчисленнях складе менше 10% [197].

З врахуванням вищевикладеного, переміщення виконавчих елементів вібропреса, а також рух твердих і рідинних частинок порції вологого дисперсного матеріалу, під час його віброударного зневоднення, на II-му та III-му етапах циклу спрацьовування ГПІ, можна розглядати як вільні коливання.

Тоді тривалість кожного з цих етапів буде дорівнювати чверті періоду T власних коливань системи виконавчих елементів вібропреса [64]. Таким чином, можна записати, що

$$t_{II} = t_{III} = \frac{1}{4} T = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m_\Sigma}{c_y}}, \quad (4.21)$$

де $m_\Sigma = m_I + m_{II}$ - сумарна маса виконавчих елементів системи.

Змінні зусилля, що діють на розглядуваному етапі на порцію вологого дисперсного матеріалу з боку нижнього (F_{mzI}) та верхнього (F_{mzII}) виконавчих елементів, а також зусилля двостороннього навантаження ($F_{mz\Sigma}$) визначаємо за допомогою рівнянь

$$\begin{aligned}
F_{mz\Sigma}(t) &= F_{mzII}(t) + F_{mzI}(t); t_I < t \leq t_{II}; \\
F_{mzI}(t) &= m_I(\ddot{x}_I - g) - (\alpha_z + \alpha_{mz} + \alpha_{pz})(\dot{x}_I - \dot{x}_H) - \\
&\quad - c_y(z_I + z_{0y}) - (c_{mz} + c_{pz})(z_I - z_{II}) - \sigma_{0z} - F_\kappa; \\
F_{mzII}(t) &= m_{II}(g - \ddot{x}_H) - (\alpha_{0,z} + \alpha_{mz} + \alpha_{pz})(\dot{x}_H - \dot{x}_I) - \\
&\quad - (c_{mz} + c_{pz})(z_{II} - z_I) - R_{0,z} \text{sign}(\dot{x}_H - \dot{x}_I) - \sigma_{0z} - P_{cm} - F_\kappa;
\end{aligned} \tag{4.22}$$

Рух твердих частинок на даному етапі описується рівняннями

$$\begin{aligned}
m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} \ddot{x}_m - \alpha_{mx} \dot{x}_m - c_{mx} x_m - \tau_{0x} &= k_f F_{mz\Sigma}(t); t_I < t \leq t_{II}; \\
m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} \ddot{y}_m - \alpha_{my} \dot{y}_m - c_{my} y_m - \tau_{0y} &= k_f F_{mz\Sigma}(t); t_I < t \leq t_{II}; \\
m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} (\ddot{x}_m - g) - \alpha_{mz} \dot{x}_m - c_{mz} z_m - \sigma_{0z} &= F_{mz\Sigma}(t); t_I < t \leq t_{II}.
\end{aligned}$$

Рівняння руху рідинних частинок для II-го етапу спрацювання ГП

$$\begin{aligned}
m_p(t) \ddot{x}_p - \alpha_{px} \dot{x}_p - c_{px} x_p - F_\kappa &= k_f F_{mz\Sigma}(t); t_I < t \leq t_{II}; \\
m_p(t) \ddot{y}_p - \alpha_{py} \dot{y}_p - c_{py} y_p - F_\kappa &= k_f F_{mz\Sigma}(t); t_I < t \leq t_{II}; \\
m_p(t) (\ddot{x}_p - g) - \alpha_{pz} \dot{x}_p - c_{pz} z_p - F_\kappa &= F_{mz\Sigma}(t); t_I < t \leq t_{II}.
\end{aligned} \tag{4.23}$$

III-й етап (див. рисунок 4.8, в)

Зусилля, що діють на порцію вологого дисперсного матеріалу визначаємо як

$$\begin{aligned}
F_{mzI}(t) &= m_I(g - \ddot{x}_I) - (\alpha_z + \alpha_{mz} + \alpha_{pz})(\dot{x}_I - \dot{x}_H) + \\
&\quad + c_y(z_I + z_{0y}) + (c_{mz} + c_{pz})(z_I - z_{II}) + \sigma_{0z} - F_\kappa;
\end{aligned}$$

$$F_{mzII}(t) = m_{II}(g - \ddot{x}_I) + P_{cm} + (c_{mz} + c_{pz})(z_{II} - z_I) -$$

$$-(\alpha_{\partial,z} + \alpha_{mz} + \alpha_{pz})(\dot{x}_I - \dot{x}_I) - R_{\partial,z} \text{sign}(\dot{x}_I - \dot{x}_I) + \sigma_{0z} - F_{\kappa};$$

$$F_{mz\Sigma}(t) = F_{mzI}(t) - F_{mzII}; t_{II} < t \leq t_{III}.$$

Рівняння руху твердих частинок на III-му етапі мають вигляд

$$m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} \ddot{x}_m + \alpha_{mx} \dot{x}_m - c_{mx} x_m - \tau_{0x} = k_f F_{mz\Sigma}(t); t_{II} < t \leq t_{III};$$

$$m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} \ddot{y}_m + \alpha_{my} \dot{y}_m - c_{my} y_m - \tau_{0y} = k_f F_{mz\Sigma}(t); t_{II} < t \leq t_{III};$$

$$m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} (\ddot{z}_m - g) + \alpha_{mz} \dot{z}_m - c_{mz} z_m - \sigma_{0z} = F_{mz\Sigma}(t); t_{II} < t \leq t_{III}.$$

Рівняння руху рідинних частинок для III-го етапу спрацювання
ГП

$$m_p(t) \ddot{x}_p + \alpha_{px} \dot{x}_p - c_{px} x_p + F_{\kappa} = k_f F_{mz\Sigma}(t); t_{II} < t \leq t_{III};$$

$$m_p(t) \ddot{y}_p + \alpha_{py} \dot{y}_p - c_{py} y_p + F_{\kappa} = k_f F_{mz\Sigma}(t); t_{II} < t \leq t_{III};$$

$$m_p(t) (\ddot{z}_p - g) + \alpha_{pz} \dot{z}_p - c_{pz} z_p + F_{\kappa} = F_{mz\Sigma}(t); t_{II} < t \leq t_{III}.$$

Наприкінці III-го етапу від нижнього виконавчого елемента вібропреса масою m_I частинкам порції матеріалу передається ударний імпульс, обумовлений взаємодією m_I із запліччям станини вібропреса [64] (див. також рисунок 5.1 та підрозділ 5.1). Враховуючи абсолютно непружний характер удару, що забезпечується оптимальними умовами гальмування вібростолу досліджуваного обладнання [64], зусилля F_{mzI} , яке діє в момент $t = t_I + t_{II} + t_{III} + t_y$ удару вібростолу на порцію матеріалу можна визначити за формулою

$$F_{mzI}(t) = \frac{m_I \dot{x}_I}{t_y},$$

де t_y – тривалість удару вібростолу розраховується як проміжок часу від моменту $t = t_{III}$ до моменту, коли його швидкість $\dot{x} = 0$ (цей останній момент часу можна визначити за допомогою верхнього рівняння (4.24)).

IV-й етап (див. рисунок 4.8, г)

Тривалість даного етапу визначається за формулою

$$t_{IV} = T_u - t_I - t_{II} - t_{III}. \quad (4.27)$$

Як вказувалось у даному підрозділі вище, на IV-му етапі при нерухомому нижньому виконавчому елементі вібропреса, спостерігаються вільні сильно затухаючі коливання верхнього виконавчого елемента та частинок порції вологого дисперсного матеріалу у прес-формі. Вказані коливання обумовлені силою інерції верхнього виконавчого елемента, а також пружними і дисипативними властивостями оброблюваного матеріалу [182].

Зусилля на виконавчих елементах та на частинках порції матеріалу на IV-му етапі визначаємо за формулами

$$F_{mzI}(t) = 0;$$

$$F_{mzII}(t) = m_{II}(g - \ddot{x}_H) - (c_{mz} + c_{pz})z_{II} - \sigma_{0z} + P_{cm} + \\ + (\ddot{x}_H(\alpha_{\partial,z} + \alpha_{mz} + \alpha_{pz}) + R_{\partial,z} + F_k) \text{sign}(\ddot{x}_H); \quad (4.28)$$

$$F_{mz\Sigma}(t) = F_{mzII}(t); t_{III} < t \leq t_{IV}.$$

Рух твердих частинок на даному етапі описується рівняннями

$$m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} \ddot{x}_m + c_{mx}x_m + \tau_{0x} + (\alpha_{mx}\ddot{x}_m + F_k) \text{sign}(\ddot{x}_m) = 0; t_{III} < t \leq t_{IV};$$

$$m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} \ddot{y}_m + c_{my}y_m + \tau_{0y} + (\alpha_{my}\ddot{y}_m + F_k) \text{sign}(\ddot{y}_m) = 0; \quad (4.29)$$

$$m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} (g - \ddot{x}_m) - c_{mz}z_m - \sigma_{0z} + \text{sign}(\ddot{x}_m)(F_{mz\Sigma}(t) + \alpha_{mz}\ddot{x}_m + F_k) = 0; t_{III} < t \leq t_{IV}.$$

Рівняння руху рідинних частинок для IV-го етапу роботи ГПП

$$\begin{aligned}
m_p(t)\ddot{x}_p + c_{px}x_p + (\alpha_p\dot{x}_p + k_f F_{mz\Sigma}(t) + F_\kappa) \text{sign}(\dot{x}_p) &= 0; \quad t_{III} < t \leq t_{IV}; \\
m_p(t)\ddot{y}_p + c_{py}y_p + (\alpha_p\dot{y}_p + k_f F_{mz\Sigma}(t) + F_\kappa) \text{sign}(\dot{y}_p) &= 0; \quad t_{III} < t \leq t_{IV}; \quad (4.30) \\
m_p(t)(g - \ddot{z}_p) - c_{pz}z_p + (F_{mz\Sigma}(t) + \alpha_{pz}\dot{z}_p + F_\kappa) \text{sign}(\dot{z}_p) &= 0; \quad t_{III} < t \leq t_{IV}.
\end{aligned}$$

Як вказувалось у даному розділі вище, завдяки статичному притисканню пуансона до порції вологого дисперсного матеріалу, забезпечується досить швидке гасіння затухаючих коливань верхнього виконавчого елемента вібропреса при нерухомому вібростолі. У зв'язку із тим, з високим ступенем достовірності можна вважати, що на IV-му етапі робочого циклу виконавчі елементи та частинки порції матеріалу у прес-формі є нерухомими; оброблюваний матеріал піддається тільки статичному навантаженню, створюваного силою тяжіння верхнього виконавчого елемента та зусиллям P_{cm} . Таким чином, спрощена формула для розрахунку F_{mzII} матиме вигляд

$$F_{mzII}(t) = m_{II}g + P_{cm}. \quad (4.31)$$

Значення $\rho_m(t)$ в об'ємі прес-форми у продовж кожного циклу віброударного інерційного навантаження будуть періодично зменшуватись і збільшуватись, а від циклу до циклу в середньому по об'єму – поступово зростати, в міру видалення з порції матеріалу рідини та ущільнення частинок твердої фази [5].

На початку I-го та II-го етапів циклу при переміщенні виконавчих елементів вібропреса вгору $\rho_m(t)$ буде найбільшою у перерізах порції матеріалу, що контактують з нижнім торцем пуансона та днищем прес-форми, у шарі, який прилягає до бокових стінок останньої та біля вертикальної осі порції (див. рисунок 4.4, а, г). У подальшому, в ході реалізації кожного з вказаних етапів $\rho_m(t)$ буде збільшуватись безпосередньо перед фронтом хвиль дотичних та стискаючих напружень, що проходять у середовищі порції і буде зменшуватись відразу за цим фронтом (див. рисунок 4.4, б, д).

На початку III-го етапу, під час переміщення виконавчих елементів вниз $\rho_m(t)$ буде мінімальною у шарах біля днища та внутрішньої поверхні прес-форми, а максимальною - біля пуансона та осі прес-форми (див. рисунок 4.4, в, е). У продовж розглядуваного етапу тверді частинки будуть все більше концентруватись у верхніх шарах та біля осі порції.

Що стосується IV-го етапу, то в ході останнього, при нерухомому вібростолі та незначних коливаннях пуансона, відбуватиметься більш рівномірне перерозподілення твердої фази по об'єму порції, з періодичним

невеликим збільшенням та зменшенням її густини $\rho_m(t)$ в основному у верхніх та периферійних шарах прес-форми.

Величини $\rho_p(t)$ навпаки, на початку I-го та II-го етапів будуть мінімальними біля днища, осі та бокових стінок прес-форми, а також у перерізі біля пуансона. У продовж цих етапів $\rho_p(t)$ буде зменшуватись перед фронтом і збільшуватись за фронтом хвиль дотичних та стискаючих напружень, що проходять у середовищі порції. На III-му – IV-му етапах $\rho_p(t)$ буде максимальною і такою, що поступово збільшується за величиною біля днища та бокових стінок прес-форми і мінімальною уздовж її осі та в перерізі нижнього торця пуансона. У зв'язку із безупинним витіканням рідини з прес-форми, середнє по об'єму порції значення $\rho_p(t)$, постійно зменшується, як у продовж кожного циклу навантаження, так й в цілому, в ході процесу зневоднення.

Середнє по об'єму порції поточне значення $\rho_m(t)$ можна визначити за формулою [187]

$$\rho_m(t) = \frac{\Sigma m_m}{W_m(t)} = \frac{m_m \cdot \varepsilon_m}{S_m (H_m - (z_I - z_{II}))}; \quad 0 < t \leq T_u, \quad (4.32)$$

де Σm_m – маса твердої фази порції матеріалу – добуток маси порції m_m та масового вмісту ε_m у ній твердих частинок; $W_m(t)$, S_m , H_m – поточне значення об'єму порції, площа її поперечного перерізу (S_m дорівнює площі поперечного перерізу порожнини прес-форми) та початкова висота порції.

Поточне значення $\rho_p(t)$ на кожному з чотирьох етапів робочого циклу визначаємо залежно від навантаження порції за рівнянням [187]

$$\rho_p(t) = \frac{\rho_p}{1 - \beta_p \Delta p_m(t)} = \frac{\rho_p}{1 - \beta_p \frac{F_{mz\Sigma}(t)}{S_m}}; \quad 0 < t \leq T_u, \quad (4.33)$$

де ρ_p – густина рідинної фази при атмосферному тиску і температурі 20°C; β_p – коефіцієнт її об'ємного стискання; $\Delta p_m(t)$ – перепад тиску рідини у прес-формі на I-му, II-му, III-му та IV-му етапах, створюваний зусиллям $F_{mz\Sigma}(t)$, що визначається за допомогою рівнянь (4.17, 4.22, 4.24, 4.28).

Густина ρ_p змінюється в основному на I-му етапі спрацьовування ГП ($0 < t \leq t_o$) в результаті різкого збільшення $F_{mz\Sigma}(t)$ від 0 до $F_{mz\Sigma max}$. При цьому зменшується $W_m(t)$, вологий дисперсний матеріал порції, в тому числі його рідинна фаза стискаються і, таким чином, дещо збільшується величина $\rho_p(t)$.

Максимальне значення останньої у момент часу $t = t_n + t_{iI}$ (див. підрозділ 5.3) розраховується за формулою

$$\rho_{p.max} = \frac{\rho_p}{1 - \beta_p \frac{F_{mz\Sigma max}}{S_m}}. \quad (4.34)$$

При виведенні формули (4.34) було прийняте припущення, що за такий короткий час, яким є тривалість відкриття основного запірною елемента віброзбуджувача t_o (для віброзбуджувача гідроімпульсного вібропреса - прототипа $t_o = 1,4 \cdot 10^{-3}$ с (див. додаток Б)), з прес-форми видаляється мінімальна кількість рідинної фази, якою можна знехтувати й прийняти, що у продовж t_o маса її залишається постійною.

Зусилля $F_{mz\Sigma max}$ можна наближено розрахувати за формулою [64]

$$F_{mz\Sigma max} = m_{II} \left(\frac{\sqrt{2E_{n.a}c_y}}{m_I + m_{II}} + g \right). \quad (4.35)$$

Розв'язуючи рівняння (4.9 – 4.33), з використанням диференціальних рівнянь руху виконавчих елементів вібропреса (5.42, 5.43), можна розрахувати основні робочі параметри процесу попереднього віброударного зневоднення, а саме: переміщення, швидкості та прискорення виконавчих елементів вібропреса, а також частинок твердої та рідинної фаз оброблюваного матеріалу, зусилля, створювані на них виконавчими елементами вібропреса у будь який момент часу циклу спрацьовування його ГПП, крім цього, визначити зміну густини фаз. Також визначаються параметри навантаження: амплітуда коливань вібростолу (як $z_{Ia} = z_{Imax}$) та максимальний тиск у порожнині гідроциліндра ГПП (як $p_{z.max} = p_3 + \Delta p_{y\partial 11}$). Частоту коливань вібростолу обчислюємо як [64, 188]

$$v = \frac{1}{T_y}. \quad (4.36)$$

4.3 Установлення залежностей параметрів ефективності від робочих параметрів процесів віброударного зневоднення

Як вже зазначалось вище (див. підрозділ 2.1), для максимально повного видалення з вологих дисперсних матеріалів рідини способом віброударного зневоднення, при мінімальних витратах енергії та часу, потрібно забезпечити оптимальні конструктивні параметри гідроімпульсного вібропреса, що буде при цьому використовуватись, а також необхідні параметри віброударного інерційного навантаження z_{Ia} , v , $p_{z.max}$. Вказані параметри мають розраховуватись, виходячи із заданих

початкових та кінцевих фізико-механічних характеристик матеріалів (вологості, густини, коефіцієнтів в'язкості, пружності, пластичності, маси і розмірів частинок) [148, 167] та робочих параметрів процесів зневоднення (див. підрозділ 4.2) [5].

Зокрема, від величини z_{1a} , v , $p_{z,max}$ залежить зусилля $F_{mz\Sigma}(t)$, а від останнього - поточні значення перепаду тисків $\Delta p_3(t)$ у середовищі порції матеріалу, під впливом якого рідинна фаза через фільтрувальні отвори d_o у бокових стінках прес-форми (див. рисунок 4.1) витікає назовні. Але при визначенні $\Delta p_3(t)$ окрім параметрів навантаження потрібно врахувати також і втрати тиску в рідинній фазі. Останні обумовлені тертям рідини по довжині каналів між твердими частинками, по яких вона переміщується до бокових стінок прес-форми, втратами у місцевих опорах (при поворотах русла каналів, їх розширенні та звуженні, при витисканні рідини через фільтрувальні отвори), а також капілярним тиском p_σ вільної рідини порції [145], який можна визначити за формулою (1.3). Необхідно взяти до уваги й те, що в процесі кожного циклу спрацьовування ГПП, форма та лінійні розміри каналів змінюються, отже збільшується або зменшується опір переміщенню по них рідини.

Діаметр отворів d_o вибирається за умовою не проходження через них найдрібніших частинок твердої фази порції (пропонується виконувати у стінках прес-форми сітку отворів діаметром 1 – 2 мм, які закривати дрібною металевією сіткою або нещільною тканиною).

Залежності для розрахунку втрат тиску при проходженні рідини по каналах між твердими частинками порції дозволять також визначати і продуктивність $\Pi_{z,p}$ процесу зневоднення за видаленою рідиною (див. формулу 2.1 та пункт 2.2.4).

Сумарний об'єм, займаний твердими частинками порції при атмосферному тиску, без прикладання віброударного навантаження, а також відсутності між ними вільної рідини дорівнює

$$\Sigma W_m = \frac{\Sigma m_m}{\rho_m} = \frac{m_m \varepsilon_m}{\rho_m}, \quad (4.37)$$

де ρ_m – густина твердої фази за вказаних вище умов.

Середній об'єм однієї твердої частинки порції розраховуємо як

$$W_m = \frac{4}{3} \pi \cdot r_m^3 = \frac{\pi \cdot d_m^3}{6}, \quad (4.38)$$

де r_m , d_m – відповідно радіус та діаметр середньої за розмірами твердої частинки порції (визначаються методом ситового аналізу).

Тоді наближене число твердих частинок порції, яке є незмінним у продовж всього процесу віброударного інерційного навантаження (умовно вважаємо, що фільтрувальні отвори прес-форми пропускають тільки рідинну фазу), складає

$$n_m = \frac{\Sigma W_m}{W_m} = \frac{b \cdot m_m \varepsilon_m}{\rho_m \pi \cdot d_m^3}. \quad (4.39)$$

На підставі представленого у підрозділі 4.1 опису закономірностей протікання процесів віброударного зневоднення, можна стверджувати, що під час його реалізації, у продовж кожного циклу віброударного інерційного навантаження порції матеріалу у прес-формі закритого типу (див. рисунок 4.1) відбувається періодичне, рівномірне і з високою частотою перерозподілення твердих частинок з більш щільним їх укладанням. Отже, можна прийняти припущення, що у будь-який момент циклу питома кількість твердих частинок у порції вологого дисперсного матеріалу $n_{m,n}(t)$ або їх число в одиниці об'єму, є величиною постійною. Значення $n_{m,n1}(t)$ під час першого (1-го) циклу віброударного навантаження знаходимо за формулою [167]

$$n_{m,n1}(t) = \frac{n_m}{W_{m1}(t)} = \frac{b \cdot m_m \varepsilon_m}{\rho_m \pi \cdot d_m^3 S_m(H_{m1} - \Delta z_1)}; 0 < t \leq T_u, \quad (4.40)$$

де $W_{m1}(t)$, H_{m1} – поточне значення об'єму та початкова висота порції під час 1-го циклу навантаження; $\Delta z_1 = z_{I-1} - z_{II-1}$ – переміщення верхнього виконавчого елемента вібропреса відносно нижнього виконавчого елемента під час 1-го циклу (див. рисунок 4.1).

Питома кількість твердих частинок у одиниці лінійного розміру порції

$$n_{m,n1}'(t) = \sqrt[3]{n_{m,n1}(t)} = \sqrt[3]{\frac{b \cdot m_m \varepsilon_m}{\rho_m \pi \cdot d_m^3 S_m(H_{m1} - \Delta z_1)}} = \frac{1}{d_m} \sqrt[3]{\frac{b \cdot m_m \varepsilon_m}{\rho_m \pi \cdot S_m(H_{m1} - \Delta z_1)}}; \quad (4.41)$$

$$0 < t \leq T_u.$$

Тоді середнє значення діаметра каналу між двома сусідніми частинками твердої фази, по яких рідина із середніх шарів порції рухається до її периферії, під час 1-го циклу навантаження, можна знайти як

$$d_{\kappa l}(t) = \frac{1 - n_{m.nl}'(t) \cdot d_m}{n_{m.nl}'(t)} = d_m \cdot \left(\frac{1}{\sqrt[3]{\frac{6 \cdot m_m \varepsilon_m}{\rho_m \pi \cdot S_m (H_{ml} - \Delta z_l)}}} - 1 \right); 0 < t \leq T_u. \quad (4.42)$$

Загальна довжина каналів у порції матеріалу під час 1-го циклу віброударного навантаження може бути визначена як відношення сумарного об'єму $\Sigma W_{pl}(t)$ рідинної фази у порції до середнього значення площі поперечного перерізу каналу $S_{\kappa l}(t)$

$$\Sigma l_{\kappa l}(t) = \frac{\Sigma W_{pl}(t)}{S_{\kappa l}(t)}; 0 < t \leq T_u. \quad (4.43)$$

Поточне значення $\Sigma W_{pl}(t)$ з врахуванням зменшення $\Delta W_m(t)$ об'єму твердої фази, обумовленого її стисканням при створенні у середовищі порції матеріалу перепаду тиску $\Delta p_m(t)$ визначаємо як

$$\begin{aligned} \Sigma W_{pl}(t) &= W_{ml}(t) - (\Sigma W_m - \Delta W_m(t)) = S_m (H_{ml} - \Delta z_l) - \\ & - \left(\frac{m_m \varepsilon_m}{\rho_m} - \frac{\Delta p_m(t) \cdot m_m \varepsilon_m}{K_m \rho_m} \right) = S_m (H_{ml} - \Delta z_l) - \frac{m_m \varepsilon_m (K_m - \Delta p_m(t))}{K_m \rho_m}; \end{aligned} \quad 0 < t \leq T_u, \quad (4.44)$$

де K_m – модуль об'ємної пружності твердої фази.
При цьому площу $S_{\kappa l}(t)$ розраховуємо як

$$S_{\kappa l}(t) = \frac{\pi \cdot (d_{\kappa l}(t))^2}{4}; 0 < t \leq T_u. \quad (4.45)$$

Поточне значення маси $m_{pl}(t)$ рідинної частинки порції матеріалу у продовж 1-го циклу віброударного навантаження визначаємо, виходячи з $\Sigma W_{pl}(t)$ (див. формулу (4.44)), $\rho_p(t)$ (див. формулу (4.33)) та числа n_p рідинних частинок у порції, яке є приблизно у 1,5 рази більшим за n_m (див. формулу (4.39) та додаток Б). Тоді

$$m_{pl}(t) = \frac{\Sigma W_{pl}(t) \cdot \rho_p(t)}{n_p} = \frac{\Sigma W_{pl}(t) \cdot \rho_p(t)}{1,5 \cdot n_m}; 0 < t \leq T_u.$$

Сумарні втрати тиску на тертя по довжині каналів при проходженні по них рідини, що видаляється з прес-форми, визначаємо за відомою формулою з врахуванням формул (4.42 - 4.45)

$$\Delta p_{m1}(t) = \lambda_1(t) \rho_p(t) \frac{\Sigma l_{\kappa 1}(t) v_p^2}{d_{\kappa 1}(t) 2}; \quad 0 < t \leq T_u, \quad (4.46)$$

де $\lambda_1(t) = \frac{64}{Re_1}$ – коефіцієнт гідравлічного тертя рідинної фази;
 $Re_1 = \frac{v_p d_{\kappa 1}(t)}{\nu_p}$ – середнє для струменів рідини у каналах порції поточне значення числа Рейнольдса; ν_p – коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини;
 v_p – швидкість руху рідини в процесі віброударного навантаження може бути знайдена за допомогою диференціальних рівнянь руху частинки (4.20, 4.23, 4.26, 4.30) або за формулою (1.8), з підстановкою до неї замість l_k - $\Sigma l_{\kappa 1}$.

Як місцеві опори у порції матеріалу, під час руху по каналах між його твердими частинками рідини, враховуємо тільки розгалуження, оскільки зміну місцеположення та розмірів розширень, звужень та поворотів каналів [198] в процесі віброударного навантаження врахувати з достатньою точністю практично неможливо. Але це й не є доцільним, оскільки в результаті періодичного та рівномірного перерозподілення твердих частинок порції, площа поперечного перерізу каналів залишається по її об'єму приблизно однаковою. Крім цього, рідина намагається рухатись до отворів у стінках як найкоротшим шляхом, сітка каналів, внаслідок малих розмірів твердих частинок, є достатньо густою, у зв'язку із чим, повороти русла каналів можна не брати до уваги. Що стосується кількості розгалужень, то наближено можна прийняти її рівною числу твердих частинок n_m порції (див. формулу 4.39)).

Тоді сумарні втрати тиску на розгалуженнях від циклу до циклу навантаження залишатимуться наближено постійними і складатимуть [198]

$$\Delta p_{m.p}(t) = \zeta_p n_m \rho_p(t) \frac{v_p^2}{2}; \quad 0 < t \leq T_u, \quad (4.47)$$

де ζ_p – середнє значення коефіцієнта місцевого опору розгалуження [198].

Поточне значення капілярного тиску $p_\sigma(t)$ вільної рідини порції, що створює опір її переміщенню до отворів d_o прес-форми (див. формулу (1.3)) визначаємо як

$$p_{\sigma}(t) = \frac{4 \cdot \sigma_{12}}{d_{\kappa l}(t) n_m}. \quad (4.48)$$

Поточні значення перепаду тиску рідинної фази у порції у продовж першого циклу віброударного зневоднення, під впливом якого вона витікає назовні знаходимо таким чином

$$\begin{aligned} \Delta p_{3l}(t) &= \Delta p_m(t) - \Delta p_{m1}(t) - \Delta p_{m.p}(t) - p_{\sigma l}(t) = \\ &= \frac{F_{mz\Sigma}(t)}{S_m} - \lambda_l(t) \rho_p(t) \frac{\Sigma l_{\kappa l}(t)}{d_{\kappa l}(t)} \frac{\mathfrak{K}_p^2}{2} - \zeta_p n_m \rho_p(t) \frac{\mathfrak{K}_p^2}{2} - \frac{4 \cdot \sigma_{12}}{d_{\kappa l}(t) n_m}; \end{aligned} \quad 0 < t \leq T_y. \quad (4.49)$$

Поточне значення витрат фільтрату, що витікає з прес-форми в процесі 1-го циклу віброударного інерційного навантаження

$$Q_{3l}(t) = \mu_o S_o n_{ol}(t) \sqrt{\frac{2 \Delta p_{3l}(t)}{\rho_p(t)}}; \quad 0 < t \leq T_y, \quad (4.50)$$

де $n_{ol}(t)$ – поточне значення кількості фільтрувальних отворів у стінках прес-формі, через які рідина виходить назовні – може бути визначено як добуток питомого числа отворів $n_{o.num}$ на одиниці площі внутрішньої поверхні стінок прес-формі та площі відкритої на даний момент поверхні (в міру ущільнення твердих частинок порції та зменшення її об'єму, все більше число фільтрувальних отворів у верхній частині прес-форми буде перекриватись пуансоном); μ_o , S_o - коефіцієнт витрат та площа поперечного перерізу фільтрувального отвору.

Отже значення $n_{ol}(t)$ знаходимо за формулою

$$n_{ol}(t) = n_{o.num} \pi \cdot D_m (H_{m1} - \Delta z_l); \quad 0 < t \leq T_y. \quad (4.51)$$

Об'єм видаленого у продовж 1-го циклу віброударного зневоднення фільтрату (див. рівняння (4.50))

$$W_{3l} = \int_0^{T_y} Q_{3l}(t) dt. \quad (4.52)$$

Під час визначення W_3 для 2-го і подальших циклів віброударного зневоднення слід врахувати зменшення H_m , обумовлене видаленням певного об'єму рідинної фази у продовж першого циклу. Зокрема висота

$H_{m,n}$ порції на початку n -го циклу віброударного навантаження може бути обчислена за формулою

$$H_{m,n} = H_m - \frac{\sum_{i=1}^{n-1} W_{3,i}}{S_m}, \quad (4.53)$$

Далі здійснюється розрахунок інших робочих параметрів процесу зневоднення для 2-го і наступних циклів віброударного навантаження.

Середнє значення діаметра каналу між двома сусідніми твердими частинками на n -му циклі (див. формулу (4.42))

$$d_{\kappa,n}(t) = d_m \cdot \left(\frac{l}{\sqrt[3]{\frac{6 \cdot m_m \varepsilon_m}{\rho_m \pi \cdot S_m (H_{m,n} - \Delta z_n)}}} - 1 \right); 0 < t \leq T_u. \quad (4.54)$$

Загальна довжина каналів у порції під час n -го циклу (див. формулу (4.43))

$$\Sigma l_{\kappa,n}(t) = \frac{4 \left(S_m (H_{m1} - \Delta z_1) - \frac{m_m \varepsilon_m (K_m - \Delta p_m(t))}{K_m \rho_m} \right)}{\pi \cdot (d_{\kappa,n}(t))^2}; 0 < t \leq T_u. \quad (4.55)$$

Поточне значення маси $m_{p,n}(t)$ рідинної частинки під час n -го циклу (див. даний підрозділ вище)

$$m_{p,n}(t) = \frac{\Sigma W_{p,n}(t) \cdot \rho_p(t)}{1,5 \cdot n_m}; 0 < t \leq T_u,$$

де $\Sigma W_{p,n}(t)$ (див. формулу (4.44))

$$\Sigma W_{p,n}(t) = S_m (H_{m,n} - \Delta z_n) - \frac{m_m \varepsilon_m (K_m - \Delta p_m(t))}{K_m \rho_m}; 0 < t \leq T_u.$$

Перепад тиску рідинної фази у порції у продовж n -го циклу віброударного навантаження (див. формулу (4.49))

$$\Delta p_{3.n}(t) = \Delta p_m(t) - \Delta p_{m.n}(t) - \Delta p_{m.p}(t) - p_{\sigma.n}(t) =$$

$$= \frac{F_{mz\Sigma}(t)}{S_m} - \lambda_n(t) \rho_p(t) \frac{\Sigma l_{\kappa.n}(t) \mathfrak{R}_p^2}{d_{\kappa.n}(t) 2} - \zeta_p n_m \rho_p(t) \frac{\mathfrak{R}_p^2}{2} - \frac{4 \cdot \sigma_{12}}{d_{\kappa.n}(t) n_m};$$

$$0 < t \leq T_u, \quad (4.56)$$

$$\text{де } \lambda_n(t) = \frac{64}{Re_n}, \text{ а } Re_n = \frac{\mathfrak{R}_p d_{\kappa.n}(t)}{\nu}$$

Поточне значення витрат рідини, що витікає з прес-форми в процесі n -го циклу віброударного зневоднення (див. формулу (4.50))

$$Q_{3.n}(t) = \mu_o S_o n_{o.n}(t) \sqrt{\frac{2 \Delta p_{3.n}(t)}{\rho_p(t)}}; \quad 0 < t \leq T_u, \quad (4.57)$$

де (див. формулу (4.51))

$$n_{o.n}(t) = n_{o.num} \pi \cdot D_m (H_{m.n} - \Delta z_n); \quad 0 < t \leq T_u. \quad (4.58)$$

Об'єм видаленого у продовж n -го циклу віброударного зневоднення фільтрату (див. рівняння (4.57))

$$W_{3.n} = \int_0^{T_u} Q_{3.n}(t) dt. \quad (4.59)$$

Загальний об'єм видаленого під час всього процесу зневоднення фільтрату

$$\Sigma W_3 = \sum_{i=1}^k W_{3.i}, \quad (4.60)$$

де k – загальне число циклів віброударного інерційного навантаження порції, які потрібно реалізувати для забезпечення заданої кінцевої вологості U_k оброблюваного матеріалу (див. формулу (1.2) та пункт 2.2.4) після завершення процесу його віброударного зневоднення, що можна визначити за формулою [127]

$$U_k = \frac{m_m - \Sigma m_m - \rho_p \Sigma W_3}{m_m - \rho_p \Sigma W_3} = 1 - \frac{\Sigma m_m}{m_m - \rho_p \Sigma W_3}. \quad (4.61)$$

Під час розрахунку оптимальних параметрів навантаження процесу попереднього віброударного зневоднення, виходячи із заданого значення $U_{к.з}$, розраховують відповідний загальний об'єм $\Sigma W_{3.3}$ рідинної фази, що потрібно видалити з порції матеріалу

$$\Sigma W_{3.3} = \frac{m_m - \frac{\Sigma m_m}{1 - U_{к.з}}}{\rho_p}. \quad (4.62)$$

Далі за формулами (4.37 – 4.59) визначаємо об'єми видаленої рідини після першого, другого і наступних циклів віброударного зневоднення ($W_{3.1}, W_{3.2}, \dots$) і додаємо їх один до одного. Даний розрахунок потрібно повторювати доти поки після чергового додавання $W_{3.k}$ отриманий загальний об'єм ΣW_3 виявиться не меншим $\Sigma W_{3.3}$. Отримане значення k відповідає необхідному числу циклів віброударного зневоднення, які потрібно здійснити до досягнення заданої кінцевої вологості $U_{к.з}$ концентрату матеріалу.

Тоді оптимальна тривалість процесу зневоднення порції вологого дисперсного матеріалу складатиме

$$\Sigma T_3 = k \cdot T_{ц}. \quad (4.63)$$

Загальна середня продуктивність досліджуваного процесу за видаленою з порції матеріалу рідиною (див. формулу (2.1))

$$\Pi_{3.p} = \frac{\rho_p \Sigma W_3}{\Sigma T_3}. \quad (4.64)$$

Продуктивність процесу за зневодненням в одиницю часу матеріалом

$$\Pi_{3.m} = \frac{m_m}{\Sigma T_3}. \quad (4.65)$$

Енерговитрати на реалізацію n -го циклу процесу зневоднення розраховуємо як

$$E_{3.n} = W_{3.n} \Delta p_{3.n}(t). \quad (4.66)$$

Загальні витрати на зневоднення порції вологого дисперсного матеріалу

$$\Sigma E_3 = \sum_{i=1}^k E_{3,i}. \quad (4.67)$$

Наближено ΣE_3 можна також визначити за формулою

$$\Sigma E_3 = \Sigma T_3 N_{e\Sigma}, \quad (4.68)$$

де $N_{e\Sigma}$ – сумарна установлена потужність електродвигунів гідроімпульсного вібропреса, на якому здійснюється процес зневоднення.

Енергоємність зневоднення C_3 розраховуємо (див. формулу (2.3)) як

$$C_3 = \frac{\Sigma E_3}{m_{p.в}} = \frac{\Sigma E_3}{\rho_p \Sigma W_3}. \quad (4.69)$$

За допомогою запропонованих у даному підрозділі рівнянь можуть бути визначені параметри ефективності процесів попереднього віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів, виходячи із їх початкових та кінцевих фізико-механічних характеристик, конструктивних параметрів гідроімпульсного обладнання та робочих параметрів процесу.

У додатку Б на підставі рівнянь, одержаних у підрозділах 4.1, 4.2, 4.3 отримані залежності (Б.14 – Б.22) для розрахунку поточних зусиль $F_{mzI}(t)$, $F_{mzII}(t)$, $F_{mz\Sigma}(t)$, створюваних виконавчими елементами гідроімпульсного вібропреса на частинках порції вологого дисперсного матеріалу (концентрату кавового шламу) у прес-формі закритого типу, під час I-го етапу 1-го циклу його попереднього віброударного зневоднення, переміщень z_I , z_{II} виконавчих елементів, стискання $z_p(t)$ рідинної фази та деформацій $z_{m.np}(t)$, $z_{m.nл}(t)$, $z_m(t)$ твердої фази шламу. У середовищі Matlab R2007a Simulink з використанням даних залежностей складена програма, блок-схеми якої наведені на рисунках 4.9, 4.10, розраховані і побудовані залежності, представлені на рисунках 4.11, 4.12 [5, 187].

Аналіз даних залежностей показує, що оскільки рушійне зусилля $P_2(t)$ (див. рисунок 4.8, а) діє на верхній виконавчий елемент вібропреса не безпосередньо, а передається від нижнього виконавчого елемента, через оброблюваний матеріал (див. рівняння (4.17), величина його зменшується, отже поточні значення $F_{mzII}(t)$ будуть основну частину часу I-го етапу меншими, ніж відповідні значення $F_{mzI}(t)$ (див. рисунок 4.11). Деформації твердої фази порції матеріалу у прес-формі - $z_{m.np}$, $z_{m.nл}$, z_m (див. рисунок 4.12) є на два порядки більшими за стискання z_p рідинної фази, що обумовлено відповідною різницею коефіцієнтів жорсткості розглядуваних фаз. Також слід відзначити, що пружна деформація твердої фази - $z_{m.np}$ значно перевищує її пластичну деформацію - $z_{m.nл}$ (див. рисунок 4.12). Деформації та стискання фаз порції вологого дисперсного матеріалу

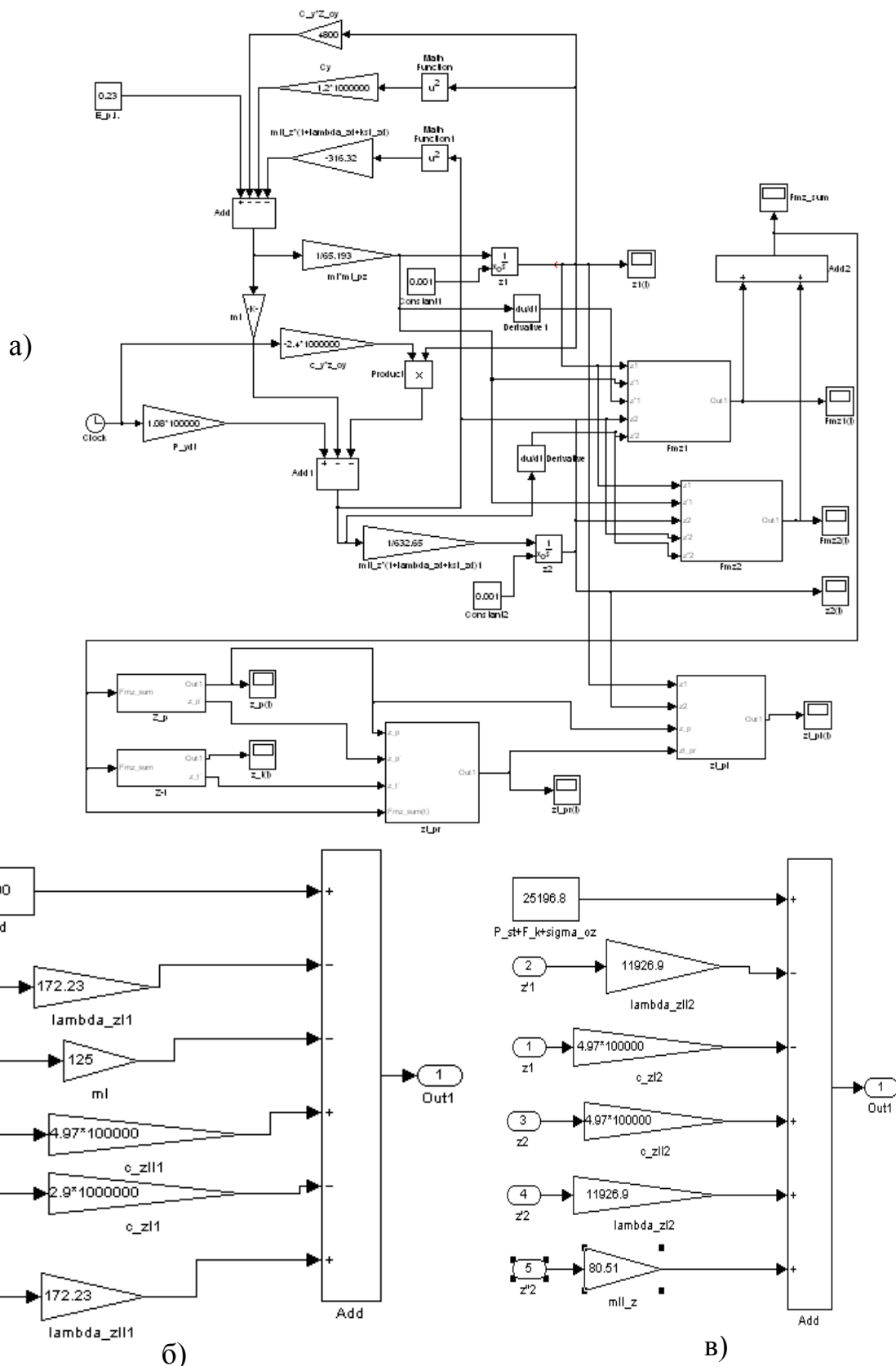
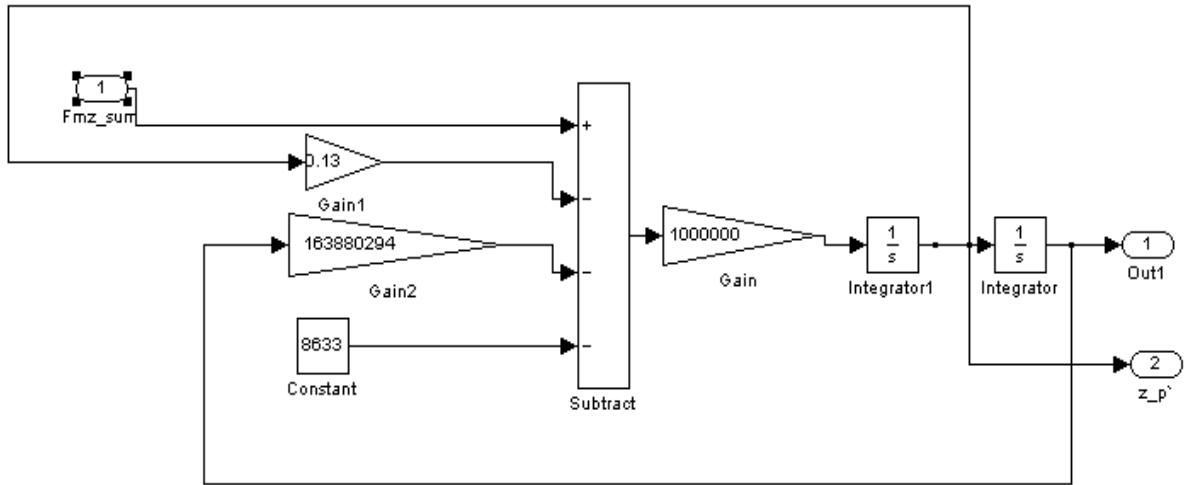
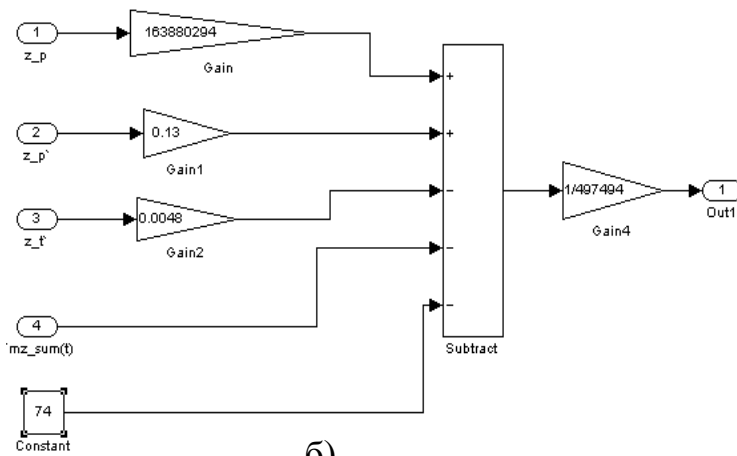


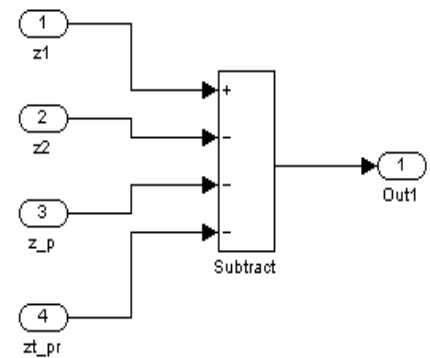
Рисунок 4.9 – Блок-схеми алгоритму Matlab-програми розрахунку робочих параметрів процесів попереднього віброударного зневоднення на I-му етапі 1-го циклу спрацьовування ГП вібропреса: а – загальна блок-схема; б, в - блок-схема підпрограм з визначення $F_{mzI}(t)$, $F_{mzII}(t)$



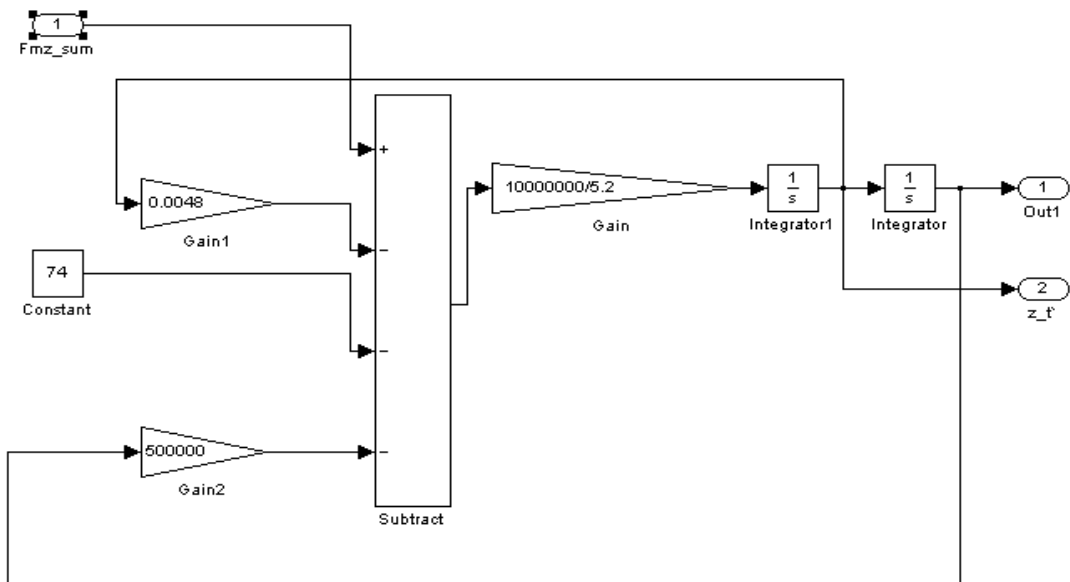
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.10 – Блок-схеми алгоритму Matlab-програми розрахунку робочих параметрів процесів попереднього віброударного зневоднення на I-му етапі 1-го циклу спрацьовування ГПІ вібропреса: а, б, в, г - підпрограми з визначення $z_p(t)$, $z_{m,np}(t)$, $z_{m,nl}(t)$, $z_m(t)$

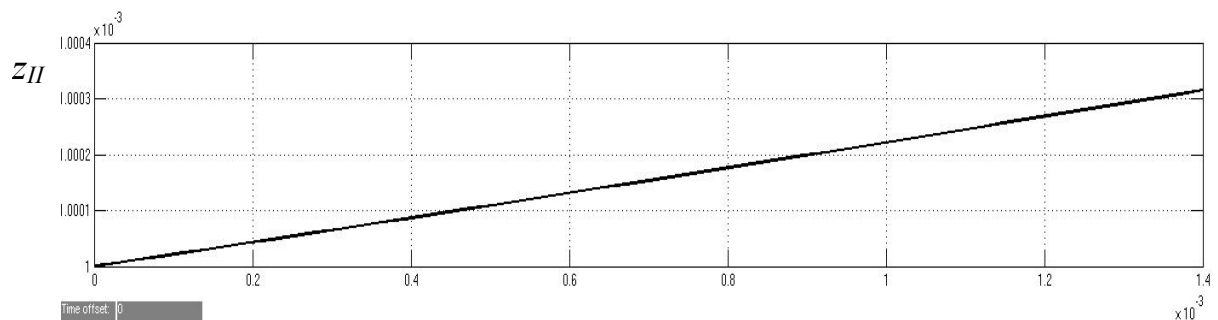
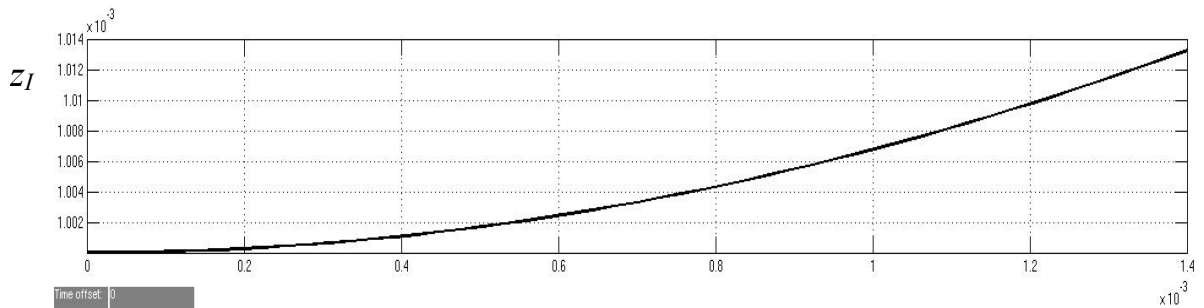
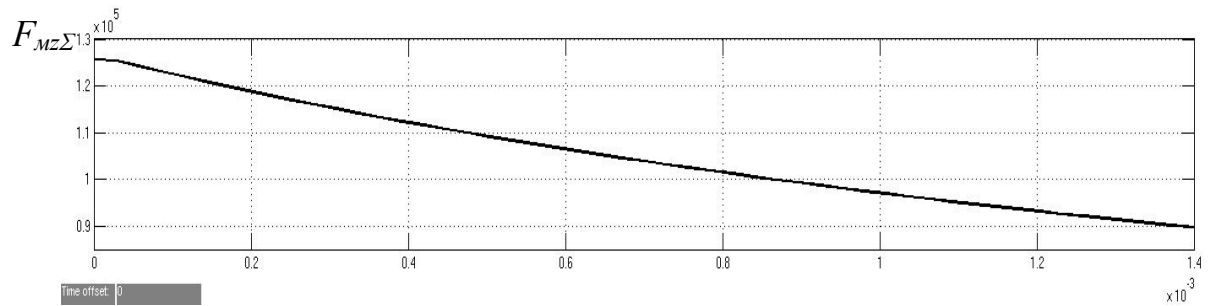
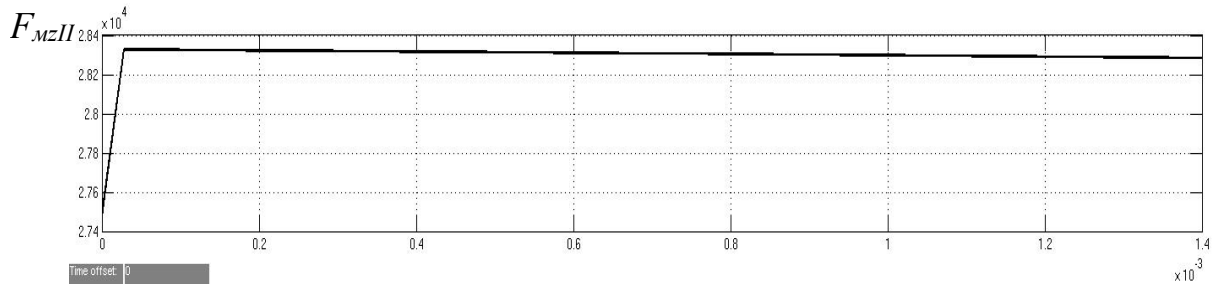
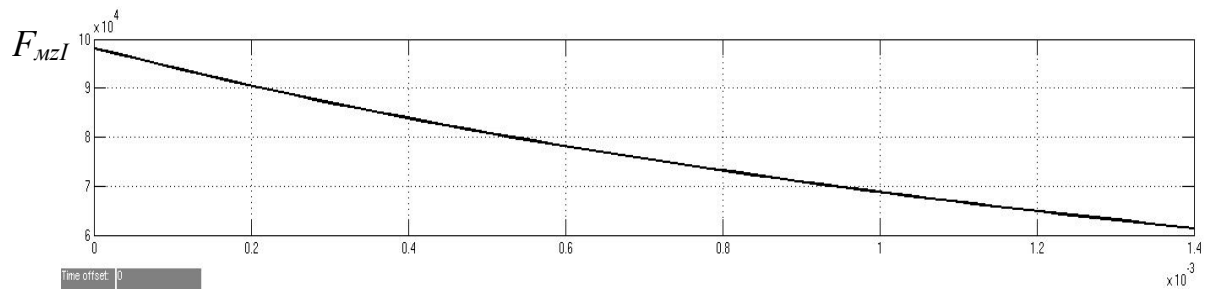


Рисунок 4.11 – Розрахункові залежності зміни в часі робочих параметрів віброударного зневоднення на I-му етапі 1-го циклу спрацьовування ГП вібропреса: зусиль, створюваних нижнім - $F_{MzI}(t)$ та верхнім - $F_{MzII}(t)$ виконавчими елементами, зусилля двостороннього навантаження - $F_{Mz\Sigma}(t)$, переміщень нижнього - z_I та верхнього - z_{II} виконавчих елементів

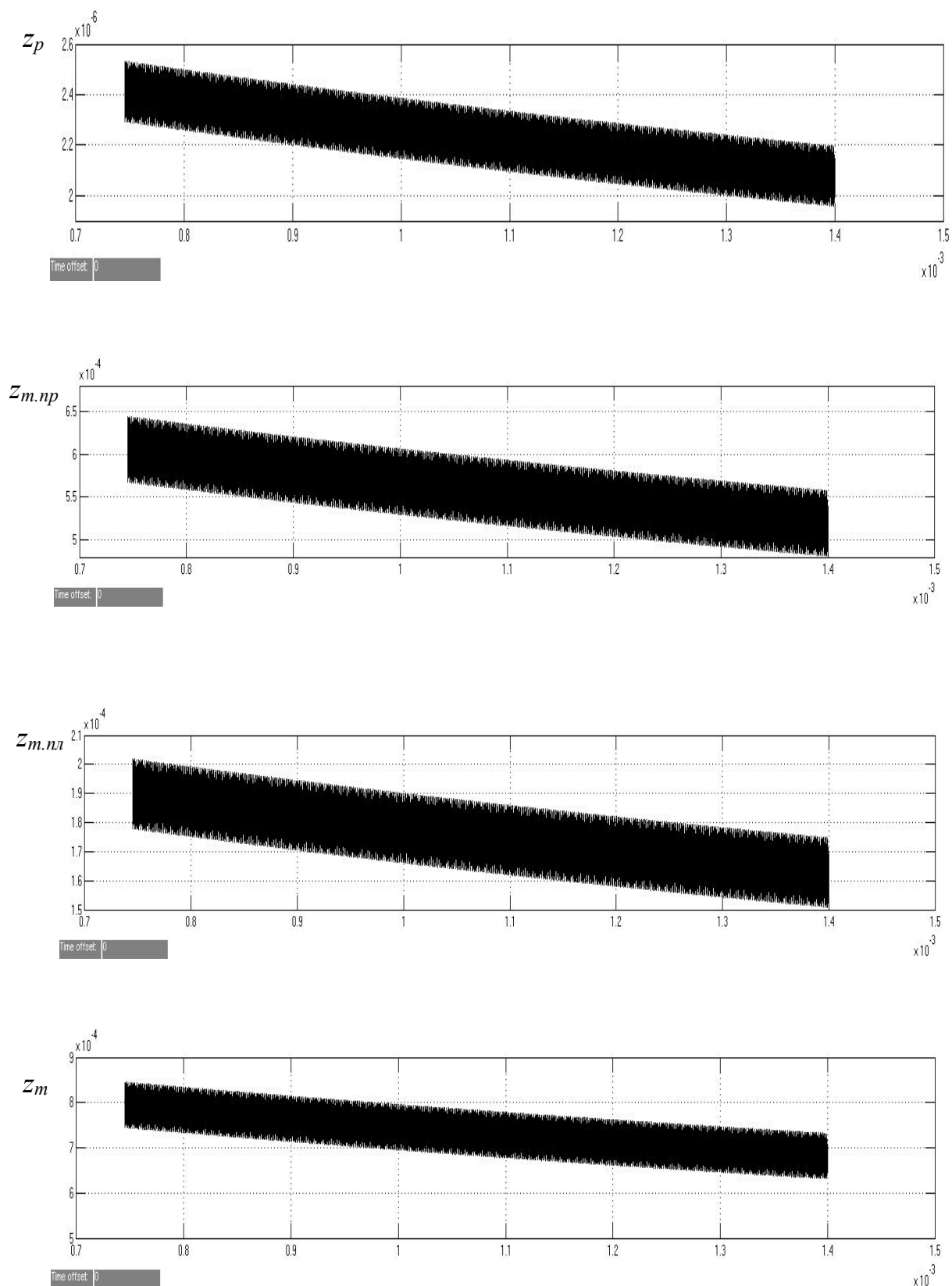


Рисунок 4.12 – Розрахункові залежності зміни в часі стискання z_p рідинної фази порції матеріалу у прес-формі під час його віброударного зневоднення, а також пружної - $z_{m.np}$, пластичної – $z_{m.nl}$ та загальної - z_m деформацій твердої фази матеріалів на I-му етапі циклу спрацьовування

змінюються з періодичними високочастотними коливаннями за величиною, що обумовлено нелінійним характером зміни зусилля навантаження (див. рисунок 4.11) та власними коливаннями частинок порції матеріалу в області резонансу (див. рисунок 4.12) [5, 187].

Крім цього, з використанням Matlab-програми при різних значеннях конструктивних та робочих параметрів гідроімпульсного вібропреса, на якому здійснюється процес попереднього зневоднення, а саме: маси m_{II} рухомої траверси з інерційними вантажами, величини попереднього стикання z_{0y} пружин повернення вібростолу, тиску відкриття p_1 віброзбуджувача та робочого об'єму W_a гідроаккумулятора (див. рисунок 4.1 та підрозділи 4.2, 4.3), а також на підставі отриманих за допомогою програми графіків $F_{mz\Sigma}(t)$, побудовані залежності $F_{mz\Sigma max}(m_{II})$, $F_{mz\Sigma max}(z_{0y})$, $F_{mz\Sigma max}(W_a)$, $F_{mz\Sigma max}(p_1)$, наведені на рисунку 4.13 [5].

Аналіз даних залежностей дозволяє зробити такі висновки. При збільшенні m_{II} зусилля $F_{mz\Sigma max}$ практично не зростає (див. рисунок 4.13, а). Останнє обумовлено тим, що основне навантаження порції матеріалу в процесі його попереднього віброударного зневоднення у прес-формі створюється з боку нижнього виконавчого елемента вібропреса (див. рисунок 4.11, а, б). В результаті збільшення W_a , а отже й зростання енергії $E_{n,a}$ (див. формулу 4.35), накопиченої у об'ємі ГП, що акумулює на етапі зарядки гідроаккумулятора (на наступному етапі дана енергія передається виконавчим елементам вібропреса, див. підрозділ 4.2), $F_{mz\Sigma max}$ збільшується (див. рисунок 4.13, б). Затягування пружин нижнього виконавчого елемента (збільшення z_{0y}) обумовлює зростання втрат енергії на подолання опору під час їх стискання і зменшення частки енергії, що передається виконавчим елементам (зменшення $F_{mz\Sigma max}$, див. рисунок 4.13, в). Але найбільше $F_{mz\Sigma max}$ залежить від p_1 (див. рисунок 4.13, г), при збільшенні якого корисне навантаження також зростає, що пояснюється збільшенням накопиченої у об'ємі $W_{a,o}$ енергії (див. підрозділ 5.2).

Представлені на рисунку 4.13 розрахункові залежності для $F_{mz\Sigma max}$ будуть у підрозділі 6.4 порівнюватись з відповідними експериментальними залежностями, отриманими за допомогою гідроімпульсного стенду – прототипу (див. рисунок 6.1). Таким чином, передбачається перевірити коректність прийнятих у підрозділах 4.1 – 4.3 припущень, а також наведених в них закономірностей протікання та рівнянь математичної моделі процесів віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів.

У додатку В представлені деякі результати теоретичних досліджень динаміки коливальних процесів у середовищі вологого дисперсного матеріалу під час його віброударного зневоднення на ІВПМ [5, 190] (див. рисунок 3.3).

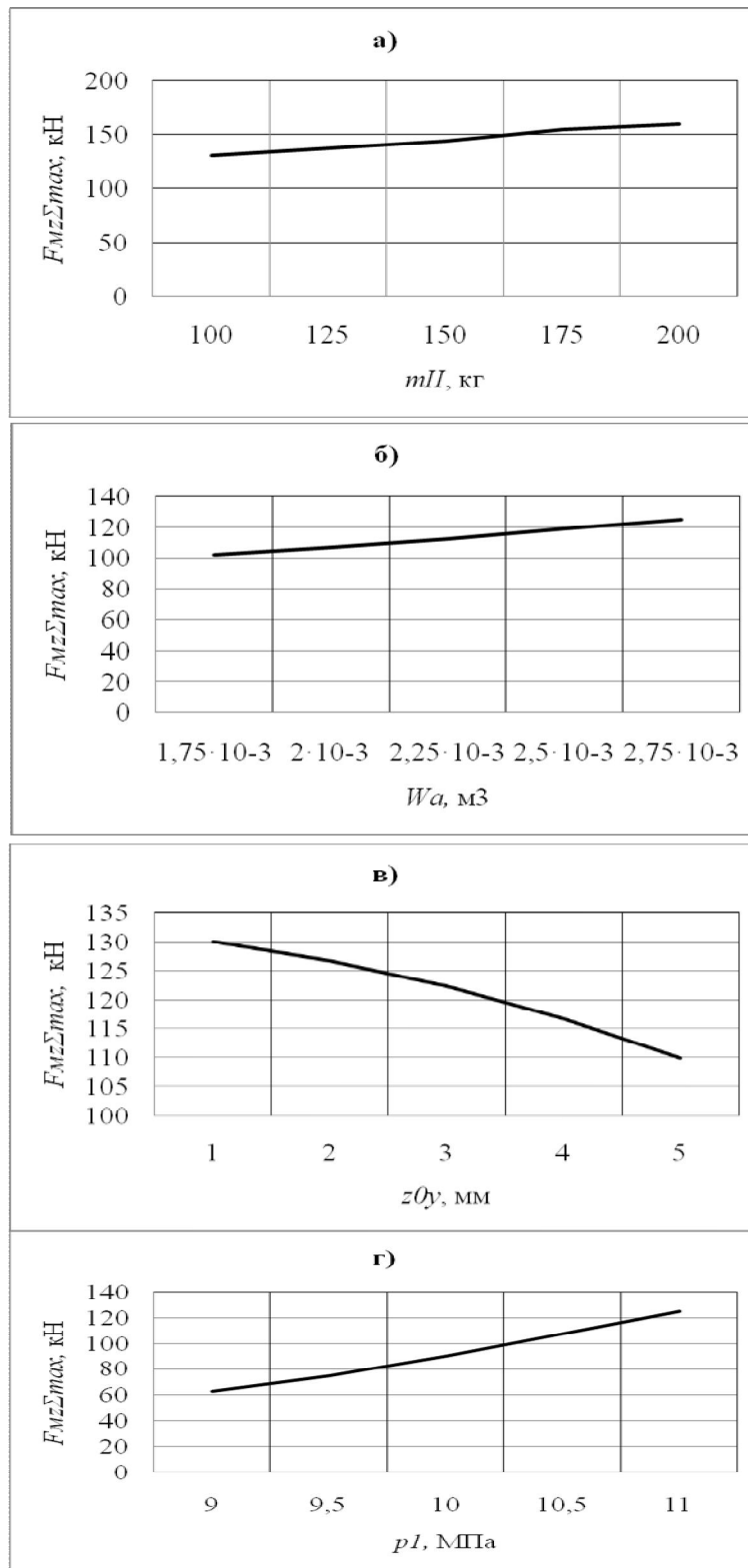


Рисунок 4.13 – Розрахункові залежності максимального зусилля $F_{Mz\Sigma}$ двостороннього навантаження порції матеріалу від маси m_{II} верхнього виконавчого елемента вібропреса (а), при $p_1 = 11$ МПа, $P_{cm} = 4$ кН, $W_a = 2 \cdot 10^{-3}$ м³, $z_{0y} = 1$ мм; робочого об'єму W_a гідроаккумулятора (б), при $P_{cm} = 4$ кН, $p_1 = 10$ МПа, $z_{0y} = 1$ мм, $m_{II} = 100$ кг; попереднього стискування z_{0y} пружин вібростолу (в), при $P_{cm} = 4$ кН, $W_a = 2,75 \cdot 10^{-3}$ м³, $p_1 = 11$ МПа, $m_{II} = 100$ кг; та тиску p_1 (г), при $P_{cm} = 4$ кН, $W_a = 2 \cdot 10^{-3}$ м³, $z_{0y} = 1$ мм, $m_{II} = 100$ кг

5 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ГІДРОІМПУЛЬСНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВІБРОУДАРНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ ВОЛОГИХ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ

Основною задачею теоретичних досліджень гідроімпульсного обладнання для віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів [5] є установлення розрахункових залежностей між його основними конструктивними параметрами та параметрами навантаження оброблюваного матеріалу. Вказані залежності у подальшому будуть застосовані для розробки методики проектного розрахунку параметрів гідроімпульсного обладнання для віброударного зневоднення.

5.1 Розробка структурної схеми гідроімпульсного вібропреса для віброударного зневоднення

На підставі розроблених і обґрунтованих у розділі 3 конструктивних схем гідроімпульсного обладнання для віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів (див. рисунки 3.2 – 3.4) можуть бути одержані їх структурні схеми, що у подальшому використовуватимуться для розробки динамічних і математичних моделей, а також методики проектного розрахунку обладнання для віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів, з врахуванням фізико-механічних характеристик останніх [5].

На рисунку 5.1 представлена структурна схема гідроімпульсного вібропреса для третього попереднього зневоднення концентрату матеріалу (див. рисунки 3.1, 3.3), що може бути створений на базі вібропреса ІВПМ-16 [64].

Вібропрес містить основний гідроімпульсний привод (ГІП) та допоміжний гідропривод з насосами 25, 18 відповідно.

Окрім насоса ГІП включає запобіжний клапан 29, регулятор витрат 30, дволінійний двопозиційний гідророзподільник 20 з ручним керуванням, рідинний гідроакумулятор 19 з регульованим робочим об'ємом W_a [195], двокаскадний трілінійний віброзбуджувач 33, підключений за схемою «на вході» [64], а також основний гідроциліндр 5, плунжер якого зв'язаний з вібростолом 12.

Допоміжний гідропривод підйому та опускання рухомої траверси 2 з інерційними вантажами 9 та пуансоном 10, що забезпечує також статичне притискання пуансона до порції вологого дисперсного матеріалу 3, який знаходиться у прес-формі 11, окрім насоса 18, складається із переливного клапана 28, чотирилінійного двопозиційного гідророзподільника 27 з ручним керуванням [195] та допоміжного гідроциліндра 1, шток якого зв'язаний з рухомою траверсою 2.

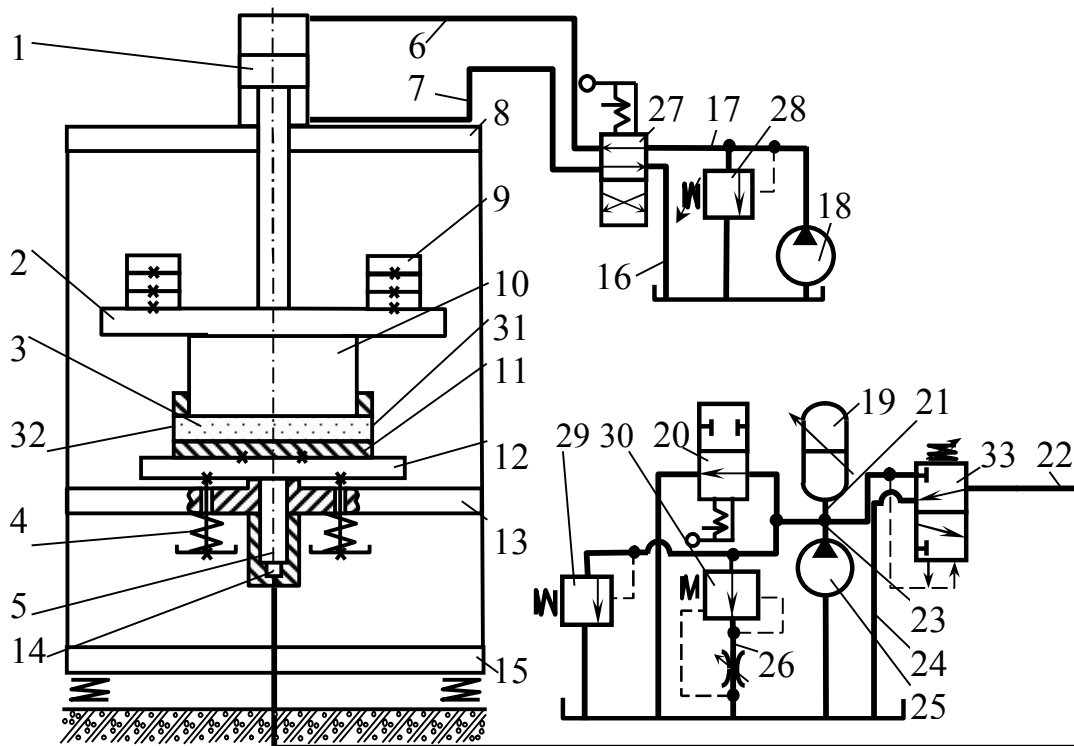


Рисунок 5.1 – Узагальнена структурна схема гідроімпульсного вібропреса для попереднього потокового віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів

Станина вібропреса складається з верхньої 8, середньої 13 та нижньої поперечин 15. Вібростіл 12 зв'язаний із середньою поперечною станиною 13 пружинами повернення 4.

Для початку процесу попереднього зневоднення на вібропресі потрібно при вимкненому ГП, увімкнути насос 18 допоміжного гідропривода і переключити гідророзподільник 27 у верхню позицію за схемою. Тоді робоча рідина буде надходити через гідророзподільник у поршневу порожнину допоміжного гідроциліндра 1, а його штокова порожнина з'єднається зі зливом. В результаті рухома траверса 2 з інерційними вантажами 9 та пуансоном 10 будуть опускатись вниз до перекривання останнім верхнього перерізу прес-форми 11. Допоміжний гідропривод вимикається. Далі вмикається електродвигун приводу шнекового преса (див. рисунок 3.3). Відокремлений на гідроімпульсному віброударному ситі (див. рисунок 3.2) концентрат вологого дисперсного матеріалу скидається у циліндр шнекового преса (див. рисунок 3.3), зневоднюється і подається шнеком через отвір 31 (див. рисунок 5.1) до прес-форми 11 гідроімпульсного вібропреса. Потрібно, щоб прес-форма була заповнена концентратом до нижнього перерізу пуансона 10, після чого шнековий прес вимикається. Якщо режимом віброударного навантаження оброблюваного матеріалу 3 передбачається створення зверху зусилля P_{cm} [199], тоді потрібно знову увімкнути насос 18 та

налаштувати переливний клапан 28 [195] на тиск p_n , відповідний заданому зусиллю P_{cm} . В іншому випадку насос 18 вмикається при мінімальному тиску p_n . Після опускання траверси 2 вниз, отвір 32 прес-форми 11 перекривається. При закритому гідророзподільнику 20 (верхня позиція за схемою) вмикається насос 25, в результаті чого починається робочий цикл спрацьовування ГПП.

На початку даного циклу, робоча рідина від насоса 25 надходить по гідролініях 23, 21 у робочу порожнину одноциклового гідроаккумулятора 19. Порожнина гідроциліндра 5 через гідролінію 14 та канал керування 22 з'єднана зі зливом. Тиск у ній робочої рідини мінімальний, у зв'язку із чим плунжер 5, вібростіл 12, прес-форма 11 з концентратом 3, пуансон 10 та рухома траверса 2 з інерційними вантажами 9 нерухомі і знаходяться у нижній за схемою позицією. Одночасно тиск робочої рідини у порожнині гідроаккумулятора 19 збільшується до величини p_1 , при якій відкривається вібростіл 33 (нижня позиція за схемою) і канал керування 22, гідролінія 14 та порожнина гідроциліндра 5 від'єднуються від зливної гідролінії 24 і сполучаються з гідролінією 21 і порожниною гідроаккумулятора 19. Тиск у порожнині гідроциліндра 5 різко збільшується і під його впливом плунжер гідроциліндра, вібростіл 12, прес-форма 11 з концентратом 3, пуансон 10, рухома траверса 2 з інерційними вантажами 9 здійснюють робочий хід вгору, зі стисканням пружин 4. В результаті цього концентрат у прес-формі піддається інерційному навантаженню з боку пуансона та інших зв'язаних з ним рухомих елементів. Рідинна фаза, яка при цьому витискається, виходить назовні через дрібні отвори прес-форми 11, закриті металевою фільтрувальною сіткою (на схемі не показані).

В результаті з'єднання нагнітальної гідролінії 21 через перший каскад вібростілу 33 зі зливом [64], тиск у гідросистемі ГПП падає до величини p_2 . Вібростіл 33 закривається (верхня позиція за схемою), доступ робочої рідини з порожнини гідроаккумулятора 19 у порожнину гідроциліндра 5 припиняється й остання з'єднується через гідролінію 14, канал 22, та гідролінію 24 зі зливним баком. Плунжер 5 з іншими рухомими елементами під дією сил їх тяжіння і стиснених пружин 4, повертається у вихідне положення. Під час зворотного ходу рухомих елементів, концентрат 3 у прес-формі 11 частково розвантажується (на даному етапі робочого циклу на нього діє тільки зусилля P_{cm} [64]), відбувається перерозподілення концентрату з більш щільним та рівномірним укладанням твердих частинок (див. підрозділ 4.1), що призводить до видалення з проміжків між ними рідинної фази. Наприкінці зворотного ходу вібростілу 12, при зіткненні його із запліччям середньої поперечини 13 станини на концентрат діє ударний імпульс знизу, а далі забезпечується його періодичне стискання та розвантаження, в результаті затухаючих коливань пуансона 10. Робоча рідина від насоса 25 починає надходити в порожнину гідроаккумулятора 19, після чого описаний

робочий цикл спрацьовування підсистеми ГПІ вібропреса знов повторюється необхідне число разів з врахуванням заданої оптимальної тривалості ΣT_3 віброударного інерційного навантаження концентрату у прес-формі досліджуваного вібропреса (див. формулу (4.63)). Далі гідророзподільник 20 перемикається у нижню за схемою позицію і вся подача робочої рідини від насоса 25 йде через нього у бак. Зворотно-поступальні переміщення вібростолу 12 припиняються. Гідророзподільник 27 перемикається у нижню позицію, в результаті чого піднімається траверса 2 та відкривається отвір 32. Вмикається шнековий прес, що забезпечує витискання з прес-форми 11 через отвір 32 зневодненої порції 3 та заповнення її через отвір 31 наступною порцією.

Як вказувалось у пункті 2.2.2 та підрозділах 4.2, 4.3, основними параметрами навантаження оброблюваного матеріалу під час його попереднього віброударного зневоднення є: максимальний тиск $p_{c,max}$ у порожнині гідроциліндра 5 ГПІ (див. рисунок 5.1), амплітуда z_{1a} та частота ν коливань вібростолу 12. Ці параметри регулюються шляхом зміни тисків відкриття p_1 та закриття p_2 віброзбуджувача 33 (у ГПІ забезпечена можливість безступінчастого регулювання в широких межах вказаних тисків), площі прохідного перерізу регулятора витрат ГПІ 30, робочого об'єму W_a гідроаккумулятора 19, величини z_{0y} попереднього стискування пружин 4, маси $m_{i,e}$ інерційних вантажів 9, зусилля статичного притискання P_{cm} пуансона 10 до порції 3 концентрату матеріалу.

5.2 Динамічне моделювання гідроімпульсного вібропреса для віброударного зневоднення

У раніше проведених дослідженнях [64] були наведені розгорнута структурна схема та загальна багатомасова динамічна модель вібропреса ІВПМ-16, при реалізації на ньому процесів віброударного навантаження сухих непластичних порошкових матеріалів. Але вказані процеси за своїм механізмом та робочими параметрами мають помітні відміни від процесів віброударного зневоднення [64, 70, 71] (див. також підрозділи 4.1, 4.2, 4.3). Так само, сухі непластичні порошки за власними фізико-механічними характеристиками суттєво відрізняються від вологих дисперсних матеріалів [64, 148]. Дані параметри досліджуваних процесів і матеріалів необхідно враховувати під час розрахунку оптимальних конструктивних параметрів гідроімпульсного вібропреса (навіть при створенні його на базі ІВПМ-16) для забезпечення найвищої ефективності віброударного зневоднення (див. підрозділ 4.3). У зв'язку із всім вищевикладеним, розгорнута структурна схема та загальна багатомасова динамічна модель ІВПМ-16 у даній роботі не наводяться, але представлені розроблені нами спрощені динамічні та математичні моделі гідроімпульсного вібропреса

для попереднього віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів на базі ІВПМ-16 (див. рисунок 5.1) [5].

На рисунку 5.2 наведені спрощені динамічні моделі робочого циклу гідроімпульсного вібропреса [5, 200], розроблені із застосуванням методики загальної теорії гідравлічних ковальсько-штампувальних машин Ю. О. Бочарова [201]. Виконання умови про те, що частота періодичного впливу вібробудувача 33 на гідромеханічну систему досліджуваного вібропреса $\nu = t_k^{-1}$ менша її першої резонансної частоти [64] дозволило застосувати при динамічному моделюванні “пружну зосереджену” модель [201], у якій робоча рідина має в'язкість і стискається, а основні параметри мас, пружних і деформованих елементів розглядаються зведеними.

Робочий цикл спрацьовування ГП вібропреса розбитий на чотири етапи, що відповідають етапам віброударного інерційного навантаження

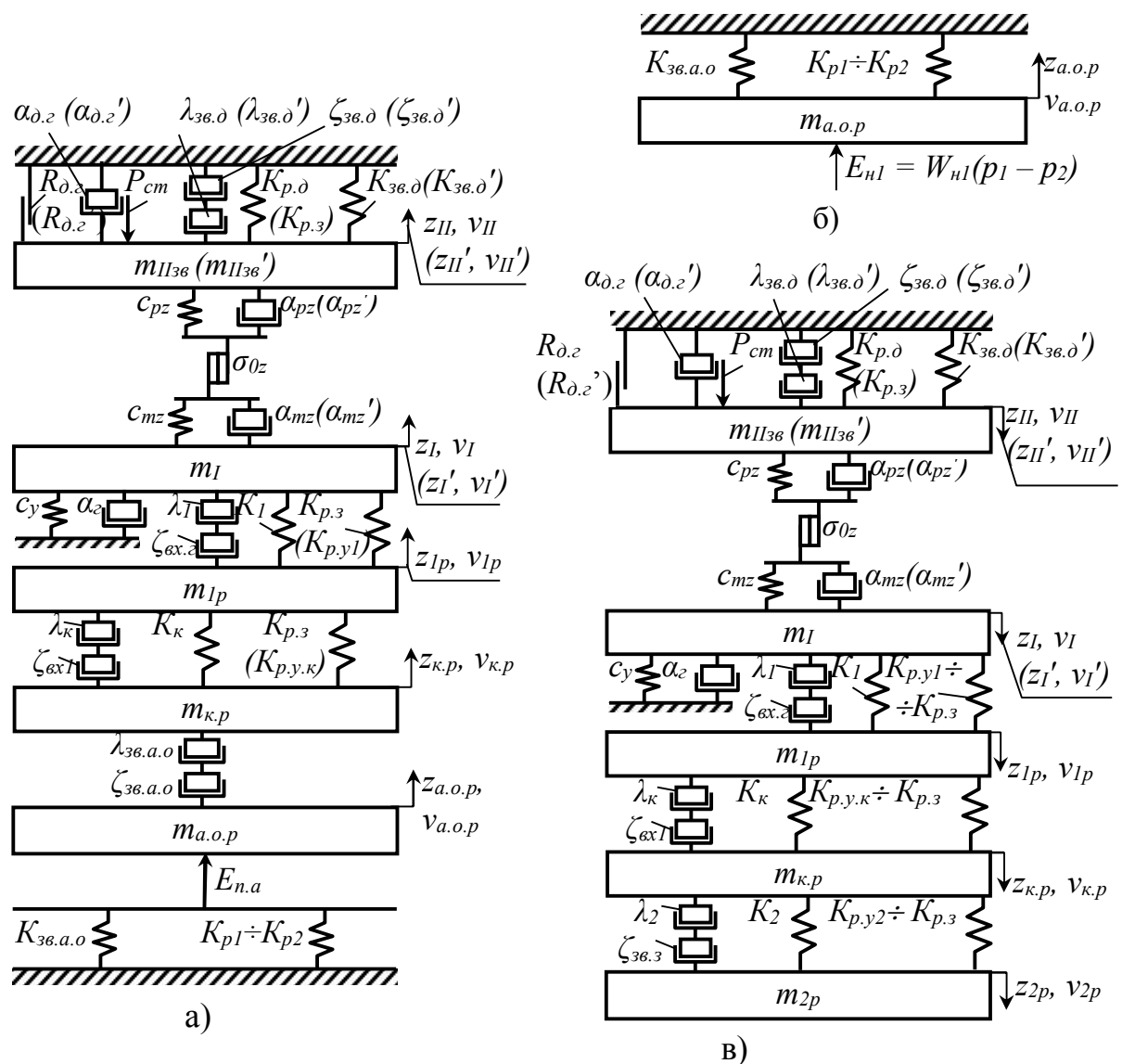


Рисунок 5.2 – Спрощені динамічні моделі гідроімпульсного вібропреса для потокового віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів: а – для I-го етапу; б, в – для II –IV-го етапів циклу спрацьовування ГП

порції вологого дисперсного матеріалу під час його попереднього зневоднення (див. підрозділи 4.1, 4.2).

На I-му етапі циклу тривалістю t_I , що відповідає часу t_o (див. підрозділ 4.2) відкриття основного запірнього елемента віброзбуджувача ГП [64], тиск $p_z(t)$ у порожнині гідроциліндра 5 (див. також рисунок 5.1) і разом з ним зусилля, створюване нижнім та верхнім виконавчими елементами вібропреса на частинках порції 3 концентрату матеріалу у прес-формі 11, збільшуються від нуля до максимального значення, в результаті чого вони зміщуються вгору; при цьому стискаються елементи пружного повернення 4 вібростолу 12.

На II-му етапі тривалістю t_{II} , що можна визначити за формулою (4.21), при з'єднанні порожнини гідроциліндра 5 через віброзбуджувач 33 зі зливом, тиск $p_z(t)$ у ній практично миттєво [194] починає падати до мінімального значення, відповідного тиску у зливному баці. Але рух виконавчих елементів вібропреса вгору за інерцією продовжується до їх зупинки у верхньому граничному положенні [64].

III-й етап тривалістю t_{III} (див. формулу (4.21)) пов'язаний з переміщенням виконавчих елементів і порції 3 концентрату матеріалу з верхнього положення вниз до удару вібростолу 12 об запліччя станини 13 [64].

У продовж IV-го етапу тривалістю t_{IV} (див. формулу 4.27) нижній виконавчий елемент вібропреса залишається нерухомим, оскільки в підсистемі ГП до гідроакумулятора 19, при закритому віброзбуджувачі 33 йде накопичення потенціальної енергії для здійснення наступного циклу віброударного навантаження і тиск $p_z(t)$ є мінімальним. Але верхній виконавчий елемент після повернення у вихідне нижнє положення і до початку наступного циклу спрацьовування ГП ще здійснює невеликі за амплітудою вертикальні затухаючі коливання, обумовлені, головним чином, пружними властивостями твердої та рідинної фаз порції 3 концентрату у прес-формі 11 [64, 166]. На даному етапі частинки порції навантажені в основному силою тяжіння верхнього виконавчого елемента та зусиллям P_{cm} .

На I-му етапі підсистема ГП, що включає гідролінію 14 (див. рисунок 5.1), канал керування 22 та порожнину гідроциліндра 5 ГП, з'єднана з насосом 25 та об'ємом $W_{a.o}$ ГП, що акумулює. На II-му, III-му та IV-му етапах гідролінія 14, канал 22 та порожнина гідроциліндра 5, з'єднується з гідролінією 24.

На динамічних моделях (див. рисунок 5.2), окрім вказаних у даному розділі вище, позначені такі зведені елементи:

m_{1p} ; m_{2p} ; $m_{a.o.p}$; $m_{к.р}$ - маси робочої рідини в гідролініях 14, 24 довжинами l_1 , l_2 , діаметрами d_1 , d_2 і площами прохідних перерізів f_1 , f_2 ; у об'ємі $W_{a.o}$, зведена до площі $f_{z.a}$ прохідного перерізу гідролінії 21 довжиною $l_{z.a}$ і діаметром $d_{z.a}$ ($W_{a.o}$ включає порожнину гідроакумулятора

19 площею поперечного перерізу S_a та гідролінії 21, 23, причому остання складається зі сталевий та гумово-металевої ділянок довжинами відповідно l_{0c} , $l_{0z.m}$, діаметрами d_{0c} , $d_{0z.m}$ і площами прохідного перерізу f_{0c} , $f_{0z.m}$; у каналі керування 22 довжиною l_k , діаметром d_k і площею прохідного перерізу f_k ;

m_I - маса нижнього виконавчого елемента вібропреса, що враховує маси плунжера 5 гідроциліндра ГІП - m_z , вібростолу 12 - m_6 , прес-форми 11 - $m_{n.ф}$ і порції 3 концентрату вологого дисперсного матеріалу - m_m : $m_I = m_z + m_6 + m_{n.ф} + m_m$;

$m_{IIзв}$, $m_{IIзв}'$ - зведена до перерізу S_z плунжера 5 маса верхнього виконавчого елемента вібропреса, що включає маси рухомої траверси 2 - $m_{p.m}$, інерційних вантажів 9 - $m_{i.в}$, пуансона 10 - m_n , а також маси робочої рідини в підсистемі допоміжного гідропривода за відсутності зусилля P_{cm} (маса $m_{IIзв}$) та за наявності P_{cm} (маса $m_{IIзв}'$) (див. підрозділ 5.3);

$K_{p.z}$, $K_{p.y1}$, $K_{p.y2}$, $K_{p.y.k}$, K_{p1} , K_{p2} , $K_{p.d}$ - зведені модулі об'ємної пружності робочої рідини при зливному тиску p_z ; при ударному тиску у гідролініях 14, 24 довжинами l_1 , l_2 та у каналі керування 22 довжиною l_k (див. підрозділ 5.3); при тисках p_1 і p_2 ; у гідросистемі допоміжного приводу при тиску p_n ;

K_1 , K_2 , $K_{зв.a.o}$, K_k , $K_{зв.d}$, $K_{зв.d}'$ - зведені модулі об'ємної пружності стінок гідроліній 14, 24 довжинами l_1 , l_2 ; об'єму $W_{a.o}$ (див. підрозділ 5.3); каналу керування 22; підсистеми допоміжного гідропривода за відсутності P_{cm} та за наявності P_{cm} ;

c_{mz} , c_{pz} , c_y - коефіцієнти жорсткості твердої і рідинної фаз порції концентрату матеріалу 3 (див. підрозділ 4.1), а також пружин 4 повернення вібростолу 12;

α_{mz} , α_{mz}' , α_{pz} , α_{pz}' , α_r , $\alpha_{d.r}$, $\alpha_{d.r}'$ - коефіцієнти в'язкого демпфірування твердої і рідинної фаз порції 3 концентрату матеріалу; в з'єднаннях плунжера 5 гідроциліндра ГІП; в з'єднаннях поршня і штока допоміжного гідроциліндра 1 за відсутності та за наявності P_{cm} [195];

σ_{0z} - межа текучості твердої фази порції 3 концентрату відносно осі z [43];

$R_{d.r}$, $R_{d.r}'$ - постійні складові зведених сил сухого тертя в ущільненнях допоміжного гідроциліндра 1 за відсутності та за наявності P_{cm} ;

λ_1 , λ_2 , λ_k , $\lambda_{зв.a.o}$, $\lambda_{зв.d}$, $\lambda_{зв.d}'$ - коефіцієнти гідравлічного тертя у гідролініях 14, 24 довжинами l_1 , l_2 , у каналі керування 22, у об'ємі $W_{a.o}$ (див. підрозділ 5.3), у підсистемі допоміжного гідропривода за відсутності та за наявності P_{cm} ;

$\zeta_{зв.a.o}$, $\zeta_{вх.z}$, $\zeta_{вх1}$, $\zeta_{зв.d}$, $\zeta_{зв.d}'$, $\zeta_{зв.z}$ - коефіцієнти місцевих опорів у об'ємі $W_{a.o}$, на вході у гідроциліндр 5 ГІП, на вході у гідролінію 14 довжиною l_1 , у підсистемі допоміжного гідропривода за відсутності та за наявності P_{cm} , у зливній підсистемі [198] (див. підрозділ 5.3);

$z_{1p}, v_{1p}, z_{2p}, v_{2p}, z_{k,p}, v_{k,p}, z_{a.o,p}, v_{a.o,p}, z_I, v_I, z_I', v_I', z_{II}, v_{II}, z_{II}', v_{II}'$ - поточні координати переміщень і поточні швидкості зведених мас робочої рідини у гідролініях 14, 24 довжиною l_1, l_2 , у каналі керування 22, у об'ємі $W_{a.o}$, а також виконавчих елементів вібропреса за відсутності та за наявності P_{cm} ;

$E_{n.a}$ – потенціальна енергія стискання робочої рідини та деформування стінок гідроліній і порожнин об'єму $W_{a.o}$ [202];

E_{nI} – кінетична енергія робочої рідини, яка надходить від насоса 25 ГП робочим об'ємом W_{nI} та подачею Q_{nI} [203].

5.3 Математичне моделювання гідроімпульсного вібропреса для віброударного зневоднення

В об'ємі $W_{a.o}$ гідросистеми ГП, що акумулює на II-му – IV-му етапах спрацьовування ГП, при закритому віброзбуджувачі 33 (див. рисунки 5.1, 5.2, б), кінетична енергія робочої рідини, яка надходить від насоса 25 переходить у потенціальну енергію $E_{n.a}$ стискання робочої рідини, деформування стінок гідроліній 23, 21 і робочої порожнини гідроакумулятора 19 [200].

Роботу $E_{n.a}$ можна знайти за формулою (4.12), з підстановкою залежностей для визначення $W_{a.o}$ (див. підрозділ 4.2), (4.14) – для розрахунку $K_{зв.a.o}$, а також з використанням формул (4.15, 4.16).

На I-му етапі спрацьовування підсистеми ГП вібропреса (див. також рисунок 5.4, а) при відкриванні віброзбуджувача 33 у приєднуваному об'ємі $W_{n.o}$ ГП (включає канал керування 22 довжиною l_k та гідролінію 14 довжиною l_l) має місце пружний гідравлічний удар, при якому тиск уздовж гідролінії та каналу поширюється хвилями. Обґрунтування даного твердження для гідросистеми ІВПМ-16 – базового обладнання досліджуваного у даному розділі вібропреса, наведено у роботі.

На I-му етапі циклу спрацьовування ГП (рисунок 5.2, а) робота $E_{n.a}$ переходить у кінетичну енергію $E_{k.n}$ переміщень зведених мас робочої рідини, втрати на тертя і місцеві втрати, у потенціальну енергію $E_{n.n}$ стискання робочої рідини і деформування стінок порожнин і гідроліній в об'ємі $W_{n.o}$ [64]. Внаслідок короткочасності етапу розрядки, кінетичну енергію робочої рідини, що надходить за цей час у гідросистему від насоса 25 можна не враховувати [64].

Рівняння балансу енергії має вигляд

$$E_{n.a} = E_{k.n} + E_{n.n}. \quad (5.1)$$

Енергія $E_{k.n}$ складається з кінетичних енергій зведених мас робочої рідини в об'ємі $W_{a.o}$, що акумулює – $E_{k.n.a}$, у каналі керування 22 довжиною l_k – $E_{k.n.k}$ та у гідролінії 14 довжиною l_l – $E_{k.n.l}$

$$E_{к.п} = E_{к.п.а} + E_{к.п.к} + E_{к.п.л}, \quad (5.2)$$

які можна знайти з виразів

$$E_{к.п.а} = \frac{m_{а.о.р} v_{а.о.р}^2}{2} (1 + \lambda_{зв.а.о} + \zeta_{зв.а.о}); E_{к.п.к} = \frac{m_{к.р} v_{к.р}^2}{2} \left(1 + \lambda_{к} \frac{l_{к}}{d_{к}} + \zeta_{вх.к} \right);$$

$$E_{к.п.л} = \frac{m_{л.р} v_{л.р}^2}{2} \left(1 + \lambda_{л} \frac{l_{л}}{d_{л}} + \zeta_{вх.л} \right). \quad (5.3)$$

Маси робочої рідини (див. підрозділ 5.2): $m_{а.о.р}$, зведена до перерізу $f_{з.а}$ гідролінії 21; $m_{к.р}$, зведена до перерізу $f_{к}$ каналу керування 22; $m_{л.р}$, зведена до перерізу $f_{л}$ гідролінії 14, визначаємо як [64]

$$m_{а.о.р} = \frac{1}{3} f_{з.а}^2 \cdot \rho_{р.р.т} \left(\frac{l_{0с}}{f_{0с}} + \frac{l_{0г.м}}{f_{0г.м}} + \frac{l_{з.а}}{f_{з.а}} + \frac{W_a}{S_a^2} \right);$$

$$m_{к.р} = \frac{1}{3} \rho_{р.р.т} \cdot l_{к} f_{к}; m_{л.р} = \frac{1}{3} \rho_{р.р.т} \cdot l_{л} \cdot f_{л}. \quad (5.4)$$

Зведений комплексний коефіцієнт гідравлічного тертя $\lambda_{зв.а.о}$ в об'ємі $W_{а.о}$, що акумулює знаходимо як [204]

$$\lambda_{зв.а.о} = \lambda_{0с} \frac{l_{0с}}{d_{0с}} + \lambda_{0г.м} \frac{l_{0г.м}}{d_{0г.м}} + \lambda_{з.а} \frac{l_{з.а}}{d_{з.а}} + \frac{1}{2} \lambda_a \cdot W_a \sqrt{\frac{\pi}{S_a^3}}, \quad (5.5)$$

де $\lambda_{0с}$, $\lambda_{0г.м}$, $\lambda_{з.а}$, λ_a – коефіцієнти гідравлічного тертя у гідролініях 23, 21 довжинами $l_{0с}$, $l_{0г.м}$, $l_{з.а}$ та у робочій порожнині одноциклового гідроакумулятора 19.

Зведений комплексний коефіцієнт місцевих опорів $\zeta_{зв.а.о}$ в об'ємі $W_{а.о}$ [204]

$$\zeta_{зв.а.о} = \frac{\left(\zeta_{зв.зл} + \frac{\zeta_{зв0с} \cdot \zeta_{зв.р} \cdot \zeta_{в.б}}{\zeta_{зв0с} + \zeta_{зв.р} + \zeta_{в.б}} + \frac{\zeta_{зв0с} \cdot \zeta_{зв.кл}}{\zeta_{зв0с} + \zeta_{зв.кл}} + \sum \zeta_{п0г.м} + \zeta_{0г.а} \right) \cdot (\zeta_{вх.а} + 2 \cdot \zeta_{н.з.а})}{\zeta_{зв.зл} + \frac{\zeta_{зв0с} \cdot \zeta_{зв.р} \cdot \zeta_{в.б}}{\zeta_{зв0с} + \zeta_{зв.р} + \zeta_{в.б}} + \frac{\zeta_{зв0с} \cdot \zeta_{зв.кл}}{\zeta_{зв0с} + \zeta_{зв.кл}} + \sum \zeta_{п0г.м} + \zeta_{0г.а} + \zeta_{вх.а} + 2 \cdot \zeta_{н.з.а}} +$$

$$+ 2 \cdot \zeta_{н.з.а} + \zeta_{з.а.зб} + \zeta_{зв.зб}, \quad (5.6)$$

де $\zeta_{зв.з1}$ - коефіцієнт місцевого опору гідророзподільника 20 [196, 198]; $\zeta_{зв.0с}$ - коефіцієнт місцевого опору при проходженні потоком робочої рідини відгалужень регулятора витрат 30 і запобіжного клапана 29; $\Sigma \zeta_{n0г.м.в}$, $\zeta_{н.г.а}$ - на поворотах гідроліній 23, 21 довжинами $l_{0г.м.в}$, $l_{г.а}$; $\zeta_{0г.а}$ - на вході з гідролінії 23 довжиною $l_{0г.м}$ у гідролінію 21 довжиною $l_{г.а}$; $\zeta_{гх.а}$ - на вході з гідроаккумулятора 19 у гідролінію 21 довжиною $l_{г.а}$; $\zeta_{г.а.зб}$ - на вході з гідролінії 21 довжиною $l_{г.а}$ у вібробуджувач 33; $\zeta_{зв.зб}$ - клапана основного каскаду вібробуджувача 33 [64].

Робота $E_{н.н}$ визначається як сума робіт стискання робочої рідини і деформування стінок у каналі керування 22 – $E_{н.н.к}$ та у гідролінії 14 – $E_{н.н.л}$

$$E_{н.н} = E_{н.н.к} + E_{н.н.л}; E_{н.н.к} = \frac{\Delta p_{уд.к}^2 l_{к} f_{к} (K_{п.у.к} + K_{к})}{2 \cdot K_{п.у.к} K_{к}}; E_{н.н.л} = \frac{\Delta p_{уд.л}^2 l_{л} f_{л} (K_{п.у.л} + K_{л})}{2 \cdot K_{п.у.л} K_{л}}. \quad (5.7)$$

Значення ударних тисків $\Delta p_{уд.к}$, $\Delta p_{уд.л}$ [204] відповідають тискам за фронтом прямої ударної хвилі на вході у канал керування 22 та у гідролінію 14 довжиною l_l і визначаються з рівнянь

$$\Delta p_{уд.к} = p_1 - p_3 - \Delta p_{вх.л} - \Delta p_{т.к}; \Delta p_{уд.л} = \Delta p_{уд.к} - \Delta p_{вх.г} - \Delta p_{м.л}, \quad (5.8)$$

де $\Delta p_{вх.л}$, $\Delta p_{т.к}$, $\Delta p_{вх.г}$, $\Delta p_{м.л}$ - втрати тиску на вході у гідролінію 14 довжиною l_l , на тертя у каналі керування 22, на вході у гідроциліндр 5 ГПП та на тертя у гідролінії 14 знаходимо за формулами [195]

$$\Delta p_{вх.л} = \rho_{п.п.т} \cdot \zeta_{вх.л} \frac{v_{к.п}^2}{2}; \Delta p_{т.к} = \rho_{п.п.т} \cdot \lambda_{к} \frac{l_{к}}{f_{к}} \frac{v_{к.п}^2}{2};$$

$$\Delta p_{вх.г} = \rho_{п.п.т} \cdot \zeta_{вх.г} \frac{v_{л.п}^2}{2}; \Delta p_{м.л} = \rho_{п.п.т} \cdot \lambda_{л} \frac{l_{л}}{f_{л}} \frac{v_{л.п}^2}{2}. \quad (5.9)$$

З рівняння (5.2) з підстановкою в нього залежностей (5.3 - 5.6) і з рівнянь (5.7) з підстановкою (5.8, 5.9) можна знайти швидкість $v_{л.п}$ і значення ударних тисків $\Delta p_{уд.к}$, $\Delta p_{уд.л}$, за допомогою яких визначити тривалість проходження t_n прямої, першої після відкриття золотника 2-го каскаду вібробуджувача 33 ударної хвилі від входу у канал керування 22 до порожнини гідроциліндра 5 ГПП, що дорівнює сумі напівфаз прямого удару у каналі керування 22 – $t_{i.к}$ і у гідролінії 14 – $t_{i.л}$ [200]

$$t_n = t_{i.к} + t_{i.л} = \frac{l_{к}}{c_{к}} + \frac{l_{л}}{c_{л}}, \quad (5.10)$$

де значення швидкості c_k ударної хвилі у каналі керування 22 визначаємо за формулою [202]

$$c_k = \frac{\Delta p_{y\delta.k}}{\rho_{p.p.t} \cdot v_{k.p}}. \quad (5.11)$$

Швидкість c_l ударної хвилі у гідролінії 14 довжиною l_l обчислюємо як [204]

$$c_l = \frac{l}{\sqrt{\frac{\rho_{p.p.t}}{K_{p.yl}} + \frac{\rho_{p.p.t} \cdot d_l}{\delta_l \cdot K_{cm}}}}, \quad (5.12)$$

де δ_l , K_{cm} – товщина стінок гідролінії 14 та модуль об'ємної пружності матеріалу її стінок (сталь); $K_{p.yl}$ – модуль об'ємної пружності визначається для тиску $\Delta p_{y\delta l} + p_z$ у гідролінії l_l за допомогою залежності (4.15).

Швидкість $v_{k.p}$ для підстановки у (5.9) визначаємо за допомогою рівняння витрат [205]

$$v_{k.p} = \frac{v_{lp} f_l}{f_k}. \quad (5.13)$$

При взаємодії фронту ударної хвилі у гідролінії 14 з плунжером гідроциліндра 5 ГП, частина кінетичної енергії робочої рідини, роботи її стискання і деформування стінок гідроліній переходить у роботу переміщення виконавчих елементів вібропреса, стискання пружин 4 пружного повернення вібростолу 12, роботу сил опору стисканню порції 3 вологого дисперсного матеріалу у прес-формі 11 та видалення з нього рідинної фази, сухого і в'язкого тертя, подолання зусилля статичного притискання пуансона 10 до порції матеріалу, що супроводжується зменшенням ударного тиску у гідролінії 14 довжиною l_l до значення $\Delta p_{y\delta ll}$ [206]. Таким чином, тиск на плунжер гідроциліндра 5 зростає за час t_{il} , рівний напівфазі $\tau_l / 2$ відбитої ударної хвилі у гідролінії 14 [205] (див. формули 5.10 - 5.12) від зливного тиску p_z до $p_{z,max} = p_z + \Delta p_{y\delta ll}$, що відповідає максимальному робочому тиску у порожнині гідроциліндра 5 ГП, у результаті чого, за час t_{il} , плунжер здобуває початкову швидкість v_{ln} [206].

Рівняння балансів енергії мають вигляд [200]:
за відсутності зусилля P_{cm}

$$\Delta E_{к.нл} + \Delta E_{н.нл} = E_{кл} + E_{клзв} + E_{к.в.т.з} + E_{к.в.т.д} + E_{к.в.т.м} +$$

$$+ E_{к.с.т.д} + E_{н.у} + E_{нл} + E_{нлзв} + E_{н.м} + E_{к.н.д.м} + E_{з.нл};$$

за наявності зусилля $P_{см}$

$$\Delta E_{к.нл}' + \Delta E_{н.нл}' = E_{кл}' + E_{клзв}' + E_{к.в.т.з}' + E_{к.в.т.д}' + E_{к.в.т.м}' +$$

$$+ E_{к.н.д.м} + E_{з.нл} + E_{к.с.т.д}' + E_{к.см} + E_{н.д.н} + E_{н.у}' + E_{нл}' + E_{нлзв}' + E_{н.м}' ,$$

де $E_{кл}$, $E_{кл}'$, $E_{клзв}$, $E_{клзв}'$ – зміна кінетичної енергії нижнього та верхнього виконавчих елементів вібропреса; $E_{к.в.т.з}$, $E_{к.в.т.д}$, $E_{к.в.т.з}'$, $E_{к.в.т.д}'$, $E_{к.в.т.м}$, $E_{к.в.т.м}'$ – робота сил в'язкого тертя при переміщенні плунжера гідроциліндра 5 ГП та поршня допоміжного гідроциліндра 1, а також при стисканні порції концентрату матеріалу; $E_{н.у}$, $E_{н.у}'$, $E_{н.м}$, $E_{н.м}'$ – зміна потенціальної енергії при стисканні елементів пружного повернення 4 вібростолу 12, а також порції 3 концентрату матеріалу; $E_{нл}$, $E_{нл}'$, $E_{нлзв}$, $E_{нлзв}'$ – робота підйому нижнього та верхнього виконавчих елементів вібропреса;

$E_{к.с.т.д}$, $E_{к.с.т.д}'$ – робота сил сухого тертя при переміщенні поршня допоміжного гідроциліндра 1; $E_{к.н.д.м}$, $E_{к.н.д.м}'$ – робота сил пластичного деформування твердих частинок порції 3 концентрату матеріалу [207]; $E_{з.нл}$ – робота зі зневоднення концентрату – видалення рідинної фази з прес-форми 11; $E_{н.д.н}$ – робота сил стискання робочої рідини і деформування стінок гідроліній і порожнин у підсистемі допоміжного гідропривода за наявності зусилля $P_{см}$ [202]; $E_{к.см}$ – робота з подолання зусилля $P_{см}$ при переміщенні вгору виконавчих елементів вібропреса.

Зміни кінетичної енергії робочої рідини в гідролінії l_1

$$\Delta E_{к.нл} = \frac{m_{1п.зв} \left(v_{1п}^2 - v_{1н}^2 \frac{S_2^2}{f_1^2} \right)}{2}; \Delta E_{к.нл}' = \frac{m_{1п.зв} \left(v_{1п}^2 - v_{1н}^2 \frac{S_2^2}{f_1^2} \right)}{2},$$

де $m_{1п.зв}$ – маса робочої рідини у гідролінії 14 довжиною l_1 , зведена до перерізу плунжера гідроциліндра 5 ГП діаметром d_2 , визначається як [195]

$$m_{1п.зв} = m_{1п} \frac{d_2^4}{d_1^4}.$$

Зміна потенціальної енергії стискання робочої рідини у гідролінії 14 довжиною l_1 і деформування її стінок

$$\Delta E_{n.nl} = \frac{l_1 \cdot f_1 (\Delta p_{y\partial l}^2 - \Delta p_{y\partial l1}^2) (K_{p.yl} + K_l)}{2 \cdot K_{p.yl} \cdot K_l}; \Delta E_{n.nl}' = \frac{l_1 \cdot f_1 (\Delta p_{y\partial l}^2 - \Delta p_{y\partial l1}'^2) (K_{p.yl} + K_l)}{2 \cdot K_{p.yl} \cdot K_l}. \quad (5.18)$$

Зміну кінетичної енергії зведеної маси нижнього виконавчого елемента вібропреса масою m_I знаходимо з виразів

$$E_{\kappa I} = \frac{m_I \cdot v_{In}^2}{2}; E_{\kappa I}' = \frac{m_I \cdot v_{In}'^2}{2}. \quad (5.19)$$

Зміна кінетичної енергії маси $m_{II3\epsilon}$ ($m_{II3\epsilon}'$), що враховує масу верхнього виконавчого елемента вібропреса $m_{II} = m_{p.m} + m_{i.6} + m_n$ і маси робочої рідини в підсистемі допоміжного приводу, зведені до перерізу плунжера гідроциліндра 5

$$E_{\kappa II3\epsilon} = \frac{m_{II3\epsilon} v_{II n}^2}{2} (1 + \lambda_{3\epsilon.\partial} + \zeta_{3\epsilon.\partial}); E_{\kappa II3\epsilon}' = \frac{m_{II3\epsilon}' v_{II n}'^2}{2} (1 + \lambda_{3\epsilon.\partial}' + \zeta_{3\epsilon.\partial}'), \quad (5.20)$$

де $v_{II n}$, $v_{II n}'$ - початкові швидкості, які отримують маси $m_{II3\epsilon}$ ($m_{II3\epsilon}'$) у момент часу $t = t_n + t_{i1}$;

зведені маси верхнього виконавчого елемента [64]

$$m_{II3\epsilon} = m_{II} + \frac{1}{3} \rho_{p.p.t} \cdot S_{\partial.2}^2 \left(\frac{W_{n.\partial}}{S_{\partial.2}^2} + \frac{l_4}{f_4} + \frac{l_5}{f_5} \right);$$

$$m_{II3\epsilon}' = m_{II} + \frac{1}{3} \rho_{p.p.t} \cdot S_{\partial.2}^2 \left(\frac{W_{n.\partial}}{S_{\partial.2}^2} + \frac{l_4}{f_4} + \frac{l_3}{f_3} \right), \quad (5.21)$$

де $W_{n.\partial}$ – середній робочий об'єм поршневої порожнини допоміжного гідроциліндра 1 площею поперечного перерізу $S_{\partial.2}$;

$l_3, f_3, l_4, f_4, l_5, f_5$ – довжини та площі прохідного перерізу гідроліній 17, 6, 16;

Зведені комплексні коефіцієнти тертя і зведені коефіцієнти місцевих опорів у підсистемі допоміжного гідроприводу [204]

$$\lambda_{3\epsilon.\partial} = \lambda_{n.\partial} \frac{1}{2} W_{n.\partial} \sqrt{\frac{\pi}{S_{\partial.2}^3}} + \lambda_4 \frac{l_4}{f_4} + \lambda_5 \frac{l_5}{f_5}; \lambda_{3\epsilon.\partial}' = \lambda_{n.\partial} \frac{1}{2} W_{n.\partial} \sqrt{\frac{\pi}{S_{\partial.2}^3}} + \lambda_4 \frac{l_4}{f_4} + \lambda_3 \frac{l_3}{f_3};$$

$$\zeta_{3\epsilon.\partial} = \zeta_{6.\partial.2} + \zeta_{3\epsilon.3.2} + \zeta_{6.6}; \zeta_{3\epsilon.\partial}' = \zeta_{6.\partial.2} + \zeta_{3\epsilon.3.2} + \zeta_{3\epsilon.3} + \zeta_{3\epsilon.\kappa.2}, \quad (5.22)$$

де $\lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_{n,d}$ - коефіцієнти гідравлічного тертя в гідролініях 17, 6, 16 довжинами l_3, l_4, l_5 та у поршневій порожнині допоміжного гідроциліндра [205]; $\zeta_{в.д.з}, \zeta_{зв.з2}, \zeta_{в.б}, \zeta_{зв.з}, \zeta_{зв.к2}$ - коефіцієнти місцевих опорів на виході з гідроциліндра 1, на золотнику гідророзподільника 27, на вході гідролінії 16 у зливний бак, на трійнику у гідролінії 17, на запобіжному клапані 28 [198].

Роботу зі зневоднення $E_{з.нI}$ порції матеріалу на I-му етапі циклу спрацьовування ГП визначаємо як [200] (див. також формулу (4.66))

$$E_{з.нI} = W_{з.нI} \Delta p_{з.нI}(t); t_n + t_{iI} \leq t \leq t_o, \quad (5.23)$$

де $W_{з.нI}, \Delta p_{з.нI}$ – відповідно об'єм видаленої на I-му етапі рідинної фази і перепад тисків, створений на даному проміжку часу у середовищі порції матеріалу, під впливом якого рідина видаляється з прес-форми.

Роботу $E_{к.н.д.м}$ ($E_{к.н.д.м}'$) з пластичного деформування порції матеріалу обчислюємо як [200]

$$E_{к.н.д.м} = \sigma_{0z} z_{In}; E_{к.н.д.м}' = \sigma_{0z} z_{In}', \quad (5.24)$$

де z_{In}, z_{In}' – переміщення маси m_I від початку циклу спрацьовування ГП до моменту часу $t = t_n + t_{iI}$.

Роботу сил в'язкого тертя плунжера гідроциліндра 5 ГП і поршня допоміжного гідроциліндра 1 знаходимо за формулами [202]

$$\begin{aligned} E_{к.в.м.з} &= \alpha_z \cdot v_{In} \cdot z_{In}; E_{к.в.м.з}' = \alpha_z \cdot v_{In}' \cdot z_{In}'; \\ E_{к.в.м.д} &= \alpha_{д.з} \cdot v_{IIн} \cdot z_{IIн}; E_{к.в.м.д}' = \alpha_{д.з}' \cdot v_{IIн}' \cdot z_{IIн}', \end{aligned} \quad (5.25)$$

де $z_{IIн}, z_{IIн}'$ – переміщення даних мас $m_{IIзв}, m_{IIзв}'$ від початку циклу спрацьовування ГП до моменту часу $t = t_n + t_{iI}$.

Коефіцієнти в'язкого демпфірування [64]

$$\alpha_z = 2 \cdot \beta \sqrt{c_y m_I}; \alpha_{д.з} = 2 \cdot \beta \sqrt{c_{д.зв} m_{IIзв}}; \alpha_{д.з}' = 2 \cdot \beta \sqrt{c_{д.зв}' m_{IIзв}'}, \quad (5.26)$$

де $\beta = 0,005$ – відносний коефіцієнт демпфірування [64].

Зведені коефіцієнти жорсткості підсистем допоміжного привода визначаємо таким чином [195]

$$c_{д.зв} = \frac{I}{\frac{I}{c_{н.д.зв}} + \frac{I}{c_{4зв}} + \frac{I}{c_{5зв}}}; c_{д.зв}' = \frac{I}{\frac{I}{c_{н.д.зв}'} + \frac{I}{c_{4зв}'} + \frac{I}{c_{3зв}'}} \quad (5.27)$$

де $c_{n.\partial.36}$, $c_{n.\partial.36}'$, c_{336} , c_{436} , c_{436}' , c_{536} - коефіцієнти жорсткості поршневої порожнини допоміжного гідроциліндра 1 і гідроліній 17, 6, 16 довжинами l_3 , l_4 , l_5 , зведені до перерізу $S_{\partial.2}$ за відсутності та наявності зусилля P_{cm} знаходимо як [64]

$$\begin{aligned} c_{n.\partial.36} &= \frac{S_{\partial.2}^2 \cdot K_{p.3} \cdot K_{\partial.2}}{W_{n.\partial} \cdot (K_{p.3} + K_{\partial.2})}; & c_{n.\partial.36}' &= \frac{S_{\partial.2}^2 \cdot K_{p.\partial} \cdot K_{\partial.2}}{W_{n.\partial} \cdot (K_{p.\partial} + K_{\partial.2})}; \\ c_{436} &= \frac{S_{\partial.2}^2 \cdot K_{p.3} \cdot K_4}{l_4 \cdot f_4 \cdot (K_{p.3} + K_4)}; & c_{436}' &= \frac{S_{\partial.2}^2 \cdot K_{p.\partial} \cdot K_4}{l_4 \cdot f_4 \cdot (K_{p.\partial} + K_4)}; \\ c_{536} &= \frac{S_{\partial.2}^2 \cdot K_{p.3} \cdot K_5}{l_5 \cdot f_5 \cdot (K_{p.3} + K_5)}; & c_{536}' &= \frac{S_{\partial.2}^2 \cdot K_{p.\partial} \cdot K_3}{l_3 \cdot f_3 \cdot (K_{p.\partial} + K_3)} \end{aligned} \quad (5.28)$$

де $K_{\partial.2}$, K_3 , K_4 , K_5 – зведені модулі об'ємної пружності порожнин допоміжного гідроциліндра 1 вібропреса та гідроліній 17, 6, 16 довжинами l_3 , l_4 , l_5 [205];

$K_{p.\partial}$ – модуль об'ємної пружності робочої рідини у підсистемі допоміжного гідропривода при тиску p_n – визначаємо за формулою (4.15).

Робота сил сухого тертя в ущільненнях штока допоміжного гідроциліндра 1

$$E_{к.с.т.\partial} = R_{\partial.2} \cdot z_{In}; \quad E_{к.с.т.\partial}' = R_{\partial.2}' \cdot z_{In}' \quad (5.29)$$

Величину сил тертя $R_{\partial.2}$ ($R_{\partial.2}'$) складно одержати розрахунковим шляхом, тому можна прийняти [64]

$$R_{\partial.2} = 0,1 \cdot S_2 \Delta p_{y\partial 11}; \quad R_{\partial.2}' = 0,1 \cdot S_2 \Delta p_{y\partial 11}' \quad (5.30)$$

Роботу $E_{к.в.т.м}$, ($E_{к.в.т.м}'$) сил в'язкого тертя твердої і рідинної фаз концентрату, що зневоднюється, знаходимо як [200]

$$E_{к.в.т.м} = (\alpha_{mz} + \alpha_{pz}) \nu_{In} \cdot z_{In}; \quad E_{к.в.т.м}' = (\alpha_{mz}' + \alpha_{pz}') \nu_{In}' \cdot z_{In}' \quad (5.31)$$

Робота сил стискання пружин 4 пружного повернення вібростолу 12, а також твердої і рідинної фаз концентрату порції 3

$$E_{n.y} = \frac{c_y \cdot (z_{0y} + z_{In})^2}{2}; \quad E_{n.y}' = \frac{c_y \cdot (z_{0y}' + z_{In}')^2}{2}; \quad (5.32)$$

$$E_{n.m} = \frac{(c_{mz} + c_{pz})z_{In}^2}{2}; E_{n.m}' = \frac{(c_{mz} + c_{pz})z_{In}'^2}{2},$$

де z_{0y} – попереднє стискання пружин 4 повернення вібростолу 12.

Зміну потенціальної енергії зведених мас нижнього та верхнього виконавчих елементів вібропреса знаходимо як

$$E_{nI} = m_I \cdot g \cdot z_{In}; E_{nI}' = m_I \cdot g \cdot z_{In}';$$

$$E_{nIIзв} = m_{IIзв} \cdot g \cdot z_{IIн}; E_{nIIзв}' = m_{IIзв}' \cdot g \cdot z_{IIн}'. \quad (5.33)$$

Роботу стискання робочої рідини і деформування стінок гідроліній та порожнин у підсистемі допоміжного гідроприводу вібропреса за наявності P_{cm} визначаємо за формулою [64]

$$E_{n.d.n} = \frac{\Delta p_{\partial}^2}{2 \cdot K_{p.\partial}} \left(\frac{W_{n.\partial} (K_{p.\partial} + K_{\partial.z})}{K_{\partial.z}} + \frac{l_4 \cdot f_4 (K_{p.\partial} + K_4)}{K_4} + \frac{l_3 \cdot f_3 (K_{p.\partial} + K_3)}{K_3} \right), \quad (5.34)$$

де Δp_{∂} - збільшення тиску в поршневій порожнині допоміжного гідроциліндра 1, викликане зменшенням об'єму, що стискається в підсистемі допоміжного приводу при переміщенні рухомої траверси 2 на величину $z_{IIн}'$ [205]

$$\Delta p_{\partial} = \frac{S_{\partial.z} \cdot z_{IIн}' \cdot K_{p.\partial}}{W_{n.\partial} + l_4 \cdot f_4 + l_3 \cdot f_3}. \quad (5.35)$$

Робота сили статичного притискання пуансона 10 до порції 3 концентрату

$$E_{k.cm} = P_{cm} \cdot z_{IIн}' = p_n \cdot S_{\partial.z} \cdot z_{IIн}'. \quad (5.36)$$

Рівняння (5.14, 5.15) можна значно спростити якщо прийняти до уваги, що зусилля, створювані на плунжері гідроциліндра 5 гідроімпульсного вібропреса ударним тиском робочої рідини мають короткочасний (імпульсний) характер. Автором за методикою [208] були виконані необхідні розрахунки і доведений імпульсний характер даних зусиль для базового вібропреса ІВПМ-16, що дозволяє розглядати переміщення його виконавчих елементів на II-му – IV-му етапах циклу спрацьовування ГП, як вільні коливання лінійної неконсервативної системи, під дією прикладеного у початковий момент часу $t = t_n + t_{i1}$ миттєвого імпульсу сили з амплітудним значенням $P_{z,max} = S_z \cdot (p_z + \Delta p_{y\partial 11})$,

$P_{z,max}' = S_z \cdot (p_z + \Delta p_{y\partial II}')$ при цьому помилка в обчисленнях складе менш 1% [197].

Можна допустити [208], що переміщення зведеної маси $m_{зв} = m_I + m_{IIзв}$ ($m_{зв}' = m_I + m_{IIзв}'$) у продовж часу $t_{il} \rightarrow 0$ також прагне до нуля. Таким чином, по завершенні дії імпульсу у момент $t = t_n + t_{il}$ маса $m_{зв}$ ($m_{зв}'$) має нульове зміщення і швидкість v_{In} (v_{In}'). На підставі цього можна допустити [200]

$$z_{In} \rightarrow 0; z_{In}' \rightarrow 0; z_{IIн} \rightarrow 0; z_{IIн}' \rightarrow 0. \quad (5.37)$$

З врахуванням вищевикладеного, рівняння балансів енергії (5.14 - 5.15) перепишуться у вигляді [200]

$$\begin{aligned} \Delta E_{к.нI} + \Delta E_{н.нI} &= \frac{m_I \cdot v_{In}^2}{2} + \frac{m_{IIзв} \cdot v_{IIн}^2}{2} (1 + \lambda_{зв.д} + \zeta_{зв.д}) + \frac{c_y \cdot z_{0y}^2}{2}; \\ \Delta E_{к.нI}' + \Delta E_{н.нI}' &= \frac{m_I \cdot v_{In}'^2}{2} + \frac{m_{IIзв}' \cdot v_{IIн}'^2}{2} (1 + \lambda_{зв.д}' + \zeta_{зв.д}') + \frac{c_y \cdot z_{0y}'^2}{2}. \end{aligned} \quad (5.38)$$

Відповідно до закону збереження імпульсів [187, 200]

$$\begin{aligned} t_3 (S_z \cdot \Delta p_{y\partial II} - c_y \cdot z_{0y}) &= m_I \cdot v_{In} + m_{IIзв} v_{IIн} (1 + \lambda_{зв.д} + \zeta_{зв.д}); \\ t_3 (S_z \cdot \Delta p_{y\partial II}' - c_y \cdot z_{0y}') &= m_I \cdot v_{In}' + m_{IIзв}' v_{IIн}' (1 + \lambda_{зв.д}' + \zeta_{зв.д}'), \end{aligned} \quad (5.39)$$

де t_3 - тривалість збільшення тиску у робочій порожнині гідроциліндра 5 ГПП до значення $p_{z,max}$, $p_{z,max}'$, максимальна величина якої дорівнює напівфазі t_{il} відбитої ударної хвилі (див. даний підрозділ вище).

При визначенні t_3 потрібно врахувати вплив хвилі зниженого тиску, яка проходить в об'ємі $W_{н.о}$, що приєднується, після закриття основного запірною елемента вібробуджувача 33 і з'єднання каналу керування 22 зі зливною гідролінією 24 (див. підрозділ 5.1). У продовж розглядуваних II-го, III-го та IV-го етапів спрацьовування підсистеми ГПП, переміщення зведених мас рідини в об'ємі $W_{н.о}$, а також мас виконавчих елементів вібропреса описує спрощена динамічна модель на рисунку 5.2, в.

У зливній гідролінії 24, внаслідок з'єднання її з каналом керування 22, проходить пряма ударна хвиля. Потенціальна енергія стисненої рідини і деформованих стінок каналу керування 22 - $E_{н.н.к}$ (див. формули 5.7) і частина енергії $E_{н.нI}$, накопичена у гідролінії 14 довжиною l_I , переходить у кінетичну енергію $E_{к2p}$ руху зведеної маси рідини m_{2p} , втрати на тертя й у місцевих опорах, а також у роботу стискування робочої рідини і

деформування стінок E_{n2} гідролінії 24 довжиною l_2 . У результаті цього в каналі керування 22 в момент закриття вібробудувача 33 виникає хвиля зниженого тиску, що переміщується до гідролінії 14 довжиною l_1 , у якій вона взаємодіє з відбитою хвилею $\Delta p_{y\partial 11}$ ($\Delta p_{y\partial 11}'$).

Для порожнини гідроциліндра 5 ГП значення t_3 і разом з ним величина $\Delta p_{y\partial 11}$ ($\Delta p_{y\partial 11}'$) визначаються довжиною l_{a1} ділянки гідролінії 14 довжиною l_1 , що відбита ударна хвиля встигає пройти до зустрічі з хвилею зниженого тиску. Остання виникає в момент часу $t = t_o$.

З врахуванням формул (4.10, 4.11, 4.12, 4.36), нехтуючи при цьому у формулі (4.12) складовою енергії $E_{n.a}$, що передається виконавчим елементам вібропреса від насоса 25 ГП з подачею Q_{n1} , тривалість відкриття вібробудувача 33 можна розрахувати як

$$t_o = \frac{l}{v} - \frac{W_{a.o}(p_1 - p_2)}{Q_{n1} \cdot K_{36.a.o}}. \quad (5.40)$$

З рівняння

$$\frac{l_1 + l_{a1}}{c_1} = t_o + \frac{l_1 - l_{a1}}{c_1}$$

визначаємо l_{a1}

$$l_{a1} = \frac{t_o \cdot c_1}{2}.$$

Тоді

$$t_3 = \frac{l_{a1}}{c_1} = \frac{t_o}{2}. \quad (5.41)$$

Для випадків коли $t_3 = \frac{t_o}{2} > t_{i1}$ тобто, відбита хвиля тиску $\Delta p_{y\partial 11}$ ($\Delta p_{y\partial 11}'$) встигає пройти всю довжину l_1 гідролінії 14 тривалість збільшення тиску в ній тиску: $t_3 = t_{i1}$.

Розв'язуючи спільно рівняння (5.38) з підстановкою (5.16 - 5.18) і рівняння (5.39) з підстановкою (5.40), (5.41), визначаємо $\Delta p_{y\partial 11}$, $\Delta p_{y\partial 11}'$ і v_{In} , v_{In}' . Приймаємо також, що $v_{In} = v_{In}$, а $v_{In}' = v_{In}'$.

Рівняння руху нижнього виконавчого елемента гідроімпульсного вібропреса під час здійснення на ньому попереднього віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів за відсутності та наявності зусилля P_{cm} статичного притискання мають вигляд [200]

$$m_I(\ddot{z} + g) + (\alpha_2 + \alpha_{mz} + \alpha_{pz})\dot{z} + c_y(z_{0y} + z_I) + (c_{mz} + c_{pz})z_I + \sigma_{0z} + F_k = P_2(t); \quad (5.42)$$

$$m_I(\ddot{z}' + g) + (\alpha_2 + \alpha_{mz}' + \alpha_{pz}')\dot{z}' + c_y(z_{0y} + z_I') + (c_{mz} + c_{pz})z_I' + \sigma_{0z} + F_k = P_2'(t); \quad 0 \leq t \leq T_u.$$

Рівняння руху верхнього виконавчого елемента за відсутності та наявності зусилля P_{cm} [200]

$$m_{II36} (\ddot{x}_H + g) + (\lambda_{36,0} + \zeta_{36,0}) \dot{x}_H^2 + (\alpha_{0,z} + \alpha_{mz} + \alpha_{pz}) x_H^2 + \\ + (c_{0,36} + c_{mz} + c_{pz}) z_{II} + \sigma_{0z} + F_k + R_{0,z} \text{sign}(\dot{x}_H) = 0; \quad (5.43)$$

$$m_{II36} '(\ddot{x}_H' + g) + (\lambda_{36,0}' + \zeta_{36,0}') \dot{x}_H'^2 + (\alpha_{0,z}' + \alpha_{mz}' + \alpha_{pz}') x_H'^2 + \\ + (c_{0,36}' + c_{mz} + c_{pz}) z_{II}' + \sigma_{0z} + F_k + R_{0,z}' \text{sign}(\dot{x}_H') + P_{cm} = 0; \\ 0 \leq t \leq T_u,$$

де F_k – сила, що утримує рідинну фазу вологого дисперсного матеріалу, який зневоднюється, у капілярах його твердих частинок (див. формулу 1.4 та підрозділ 4.2)); $P_z(t)$ – зміна зовнішнього силового впливу на плунжер гідроциліндра 5 ГП у продовж періоду T_u його спрацьовування можна представити у вигляді (див. також залежність 5.10) [200]

$$P_z(t) = 0; P_z'(t) = 0 \text{ при } 0 \leq t < t_n + t_3; P_z(t) = P_{z,max} (P_z'(t) = P_{z,max}') \text{ при } t = t_n + t_3;$$

$$P_z(t) = 0; P_z'(t) = 0 \text{ при } t_n + t_3 < t \leq T_u. \quad (5.44)$$

Основними параметрами навантаження порції вологого дисперсного матеріалу під час його попереднього віброударного зневоднення на гідроімпульсному вібропресі, є: максимальний тиск $p_{z,max}$ ($p_{z,max}'$) у порожнині гідроциліндра ГП, амплітуда z_{Ia} (z_{Ia}') і частота ν переміщення його плунжера. Саме від цих параметрів в найбільшій мірі залежать параметри ефективності процесу віброударного зневоднення: продуктивність робочого процесу $\Pi_{z,p}$ за видаленою в одиницю часу рідиною, енергоємність ϵ_3 та кінцева вологість U_k концентрату матеріалу, що зневоднюється (див. пункт 2.2.2 та підрозділи 4.2, 4.3).

Для визначення $p_{z,max}$ ($p_{z,max}'$) використовуємо формули

$$p_{z,max} = \Delta p_{y\partial 11} + p_3; p_{z,max}' = \Delta p_{y\partial 11}' + p_3. \quad (5.45)$$

Виходячи з $p_{z,max}$ ($p_{z,max}'$) можна розрахувати максимальне значення перепаду тиску $\Delta p_{m,max}$ ($\Delta p_{m,max}'$) в середовищі порції вологого дисперсного матеріалу, що знаходиться у прес-формі в процесі його попереднього віброударного зневоднення

$$\Delta p_{m.max} = \left(\begin{array}{l} p_{z,max} \cdot S_z - c_y(z_{0y} + z_{In}) - \alpha_z v_{In} - \frac{(m_I - m_{II36})v_{In}}{t_3} + \\ + (\lambda_{36,d} + \zeta_{36,d})v_{In}^2 + \alpha_{d,z} \cdot v_{In} + c_{d,36} \cdot z_{IIIn} + R_{d,z} \end{array} \right) / S_M;$$

$$\Delta p_{m.max}' = \left(\begin{array}{l} p_{z,max}' \cdot S_z - c_y(z_{0y} + z_{In}') - \alpha_z v_{In}' - \frac{(m_I - m_{II36}')v_{In}'}{t_3} + \\ + (\lambda_{36,d}' + \zeta_{36,d}')v_{In}'^2 + \alpha_{d,z}' \cdot v_{In}' + c_{d,36}' \cdot z_{IIIn}' + R_{d,z}' + 2 \cdot P_{cm} \end{array} \right) / S_M. \quad (5.46)$$

Початкові зміщення z_{In} (z_{In}'), z_{IIIn} (z_{IIIn}') виконавчих елементів розраховуємо за допомогою рівнянь (5.14, 5.15) з підстановкою формул (5.16 – 5.36). При цьому отримуємо рівняння

$$\frac{m_{I p.36} v_{1p}^2}{2} + \frac{l_1 \cdot f_1(\Delta p_{y\delta 1}^2 - \Delta p_{y\delta 11}^2)(K_{p.y1} + K_1)}{2 \cdot K_{p.y1} \cdot K_1} = \frac{v_{In}^2 (m_I + m_{II3l})}{2} \times$$

$$\times (1 + \lambda_{36,d} + \zeta_{36,d}) + W_{3,nI} \Delta p_{3,nI}(t) + \sigma_{0z} z_{In} + R_{d,z} \cdot z_{IIIn} + v_{In} ((\alpha_z + \alpha_{mz} + \alpha_{pz}) z_{In} +$$

$$+ \alpha_{d,z} \cdot z_{IIIn}) + \frac{c_y \cdot (z_{0y} + z_{In})^2}{2} + \frac{(c_{mz} + c_{pz}) z_{In}^2}{2} + m_I \cdot g \cdot z_{In} + m_{II36} \cdot g \cdot z_{IIIn};$$

$$\frac{m_{I p.36} v_{1p}'^2}{2} + \frac{l_1 \cdot f_1(\Delta p_{y\delta 1}'^2 - \Delta p_{y\delta 11}'^2)(K_{p.y1} + K_1)}{2 \cdot K_{p.y1} \cdot K_1} = \frac{v_{In}'^2 (m_I + m_{II3l}')}{2} \times$$

$$\times (1 + \lambda_{36,d}' + \zeta_{36,d}') + W_{3,nI} \Delta p_{3,nI}(t) + \sigma_{0z} z_{In}' + v_{In}' ((\alpha_z + \alpha_{mz}' + \alpha_{pz}') z_{In}' + \quad (5.47)$$

$$+ \alpha_{d,z}' \cdot z_{IIIn}') + \frac{c_y \cdot (z_{0y} + z_{In}')^2}{2} + \frac{(c_{mz} + c_{pz}) z_{In}'^2}{2} +$$

$$+ m_I \cdot g \cdot z_{In}' + m_{II36}' \cdot g \cdot z_{IIIn}' + R_{\partial.z}' \cdot z_{IIIn}' + \frac{\Delta p_{\partial}^2}{2 \cdot K_{p,\partial}} \times$$

$$\times \left(\frac{W_{n,\partial} (K_{p,\partial} + K_{\partial.z})}{K_{\partial.z}} + \frac{l_4 \cdot f_4 (K_{p,\partial} + K_4)}{K_4} + \frac{l_3 \cdot f_3 (K_{p,\partial} + K_3)}{K_3} \right) + p_n \cdot S_{\partial.z} \cdot z_{IIIn}'.$$

У рівняння (5.46) замість z_{IIIn} (z_{IIIn}') слід підставити залежності

$$z_{IIIn} = z_{In} - \frac{W_{3.nI}}{S_M}; \quad z_{IIIn}' = z_{In}' - \frac{W_{3.nI}}{S_M}. \quad (5.48)$$

Амплітуди z_{Ia} (z_{Ia}') коливань нижнього виконавчого елемента вібропреса знаходимо як [200]

$$z_{Ia} = z_{In} + z_{I6}; \quad z_{Ia}' = z_{In}' + z_{I6}', \quad (5.49)$$

де зміщення z_{I6} (z_{I6}') виконавчого елемента у граничне верхнє положення на II-му етапі циклу спрацьовування ГП, від моменту часу $t = t_o$ до моменту $t = t_{II} = \frac{1}{4}T = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m_{\Sigma}}{c_y}}$ (див. формулу (4.21)) визначаємо як

$$z_{I6} = \frac{v_{In}^2}{2 \cdot a_I}; \quad z_{I6}' = \frac{v_{In}'^2}{2 \cdot a_I'}. \quad (5.50)$$

У формулах (5.50) a_I (a_I') – прискорення, з якими переміщується нижній виконавчий елемент на II-му етапі циклу можна знайти за допомогою формул, одержаних з рівнянь (5.42, 5.43), (5.46) [200]

$$a_I = \left(\begin{array}{l} \alpha_z \cdot v_{In} + c_y (z_{0y} + z_{In} + z_{I6}) + (\lambda_{36,\partial} + \zeta_{36,\partial}) v_{In}^2 + \\ + \alpha_{\partial.z} \cdot v_{In} + c_{\partial.36} \cdot z_{IIIn} + R_{\partial.z} - S_z (p_{z,max} + p_2) \end{array} \right) / \left(2 \cdot m_I + \frac{m_{II36} g}{m_I} + g \right); \quad (5.51)$$

$$a_I' = \left(\begin{array}{l} \alpha_z' \cdot v_{In}' + c_y (z_{0y} + z_{In}' + z_{I6}') + (\lambda_{36,\partial}' + \zeta_{36,\partial}') v_{In}'^2 + \\ + \alpha_{\partial.z}' \cdot v_{In}' + c_{\partial.36}' \cdot z_{IIIn}' + R_{\partial.z}' - S_z (p_{z,max}' + p_2) \end{array} \right) / \left(2 \cdot m_I + \frac{m_{II36}' g + P_{cm}}{m_I} + g \right);$$

Частоту ν , з врахуванням формул (4.36, 4.10, 4.11, 4.13) можна визначити як

$$\nu = \frac{I}{T_{\text{ц}}} = \frac{I}{t_o + t_{n.m}} = \frac{I}{t_e + t_{n.m} + t_{n.m}}, \quad (5.52)$$

де $t_{n.m}$ – тривалість падіння тиску у зливному об'ємі W_e віброзбуджувача ГПІ вібропреса від p_2 до p_3 [64]. Величина $t_{n.m}$ залежить від площі $f_{\text{др.в}}$ прохідного перерізу дроселя віброзбуджувача, встановленого у його зливній гідролінії. Об'єм ΔW_e робочої рідини, що повинен пройти через $f_{\text{др.в}}$ для того, щоб тиск у W_e зменшився від p_2 до p_3 можна знайти за формулою [205]

$$\Delta W_e = \frac{W_e (p_2 - p_3)}{K_{p.cp}}, \quad (5.53)$$

де $K_{p.cp}$ визначаємо за формулою

$$K_{p.cp} = \frac{K_{p.2} + K_{p.3}}{2}.$$

Тоді [205]

$$t_{n.m} = \frac{\Delta W_e}{f_{\text{др.в}} \mu_{\text{др.в}}} \sqrt{\frac{\rho_{p.p.t}}{2(p_2 - p_3)}}, \quad (5.54)$$

де $\mu_{\text{др.в}}$ – коефіцієнт витрат дроселя віброзбуджувача [205].

5.4 Розрахунок і аналіз залежностей параметрів навантаження під час віброударного зневоднення від конструктивних параметрів гідроімпульсного вібропреса

У додатку Ж наведена комп'ютерна Ексел-програма розрахунку параметрів навантаження вологого дисперсного матеріалу (максимального тиску $p_{e.max}$ ($p_{e.max}'$) робочої рідини у порожнині гідроциліндра ГПІ, амплітуди z_{1a} (z_{1a}') і частоти ν переміщення його плунжера) від основних конструктивних параметрів гідроімпульсного вібропреса для попереднього віброударного зневоднення на базі ІВПМ-16 [64]: зусилля P_{cm} статичного притискання пуансона до порції концентрату у прес-формі, величини попереднього стискання z_{0y} пружин повернення вібростолу, маси m_{II} рухомої траверси зі змінними інерційними вантажами і робочого об'єму W_a одноциклового гідроаккумулятора [200] (рисунки 5.3 – 5.5). Програма

складена на підставі формул підрозділів 4.2, 4.3, 5.3 та значень параметрів, наведених у додатках А, Б [5].

За допомогою отриманих залежностей можна здійснювати регулювання конструктивних параметрів гідроімпульсного вібропреса для установаження заданих оптимальних параметрів навантаження вологих дисперсних матеріалів, виходячи з їх початкових та кінцевих фізико-механічних характеристик та за умови забезпечення найвищої ефективності процесу (максимальної продуктивності $P_{з,р}$, $P_{з,м}$, мінімальної енергоємності ϵ_3 та заданої кінцевої вологості U_k концентрату) – (див. підрозділи 4.3 та 7.1). Крім цього, зіставляючи залежності на рисунках 5.3 – 5.5 з відповідними експериментальними залежностями, одержаними за допомогою гідроімпульсного стенду-прототипу для віброударного зневоднення (див. підрозділ 6.5), можна довести коректність, розроблених у підрозділах 5.2, 5.3 динамічних та математичних моделей.

На підставі залежностей, представлених на рисунках 5.3 – 5.5 зроблені такі висновки. Одним з параметрів, що найбільшою мірою впливають на значення $p_{z,max}$ є величина z_{0y} (див. рисунок 5.3, в), зі збільшенням якої $p_{z,max}$ падає. Останнє обумовлено тим, що при затягуванні пружин вібростолу більша частина енергії імпульсу, накопиченої у об'ємі $W_{a,o}$ (див. підрозділ 5.2), витрачається на подолання сили пружності, створеної даними пружинами. Також $p_{z,max}$ помітно залежить від p_1 (див. рисунок 5.3, г), з підвищенням якого $p_{z,max}$ зростає, що пояснюється збільшенням енергії імпульсу. Зміна W_a (див. рисунок 5.3, б) практично не впливає на $p_{z,max}$. Частота ν помітно залежить лише від W_a та p_1 (див. рисунок 5.4, а, б) – при збільшенні вказаних параметрів ν зменшується, що обумовлено збільшенням тривалості етапу накопичення енергії у об'ємі $W_{a,o}$. Амплітуда z_{1a} найкраще регулюється при зміні m_{II} , z_{0y} та p_1 (див. рисунки 5.4, в та 5.5, а, в). У випадку підвищення m_{II} та z_{0y} , амплітуда падає, що пов'язано з додатковими втратами енергії імпульсу на піднімання більшої маси та подолання більшої сили опору пружин повернення вібростолу. При підвищенні p_1 амплітуда зростає, через збільшення енергії імпульсу. Варіювання величинами W_a та P_{cm} (у випадку використання статичного притискання пуансона до порції концентрату матеріалу) практично не впливає на z_{1a} (див. рисунки 5.5, б, г) [5].

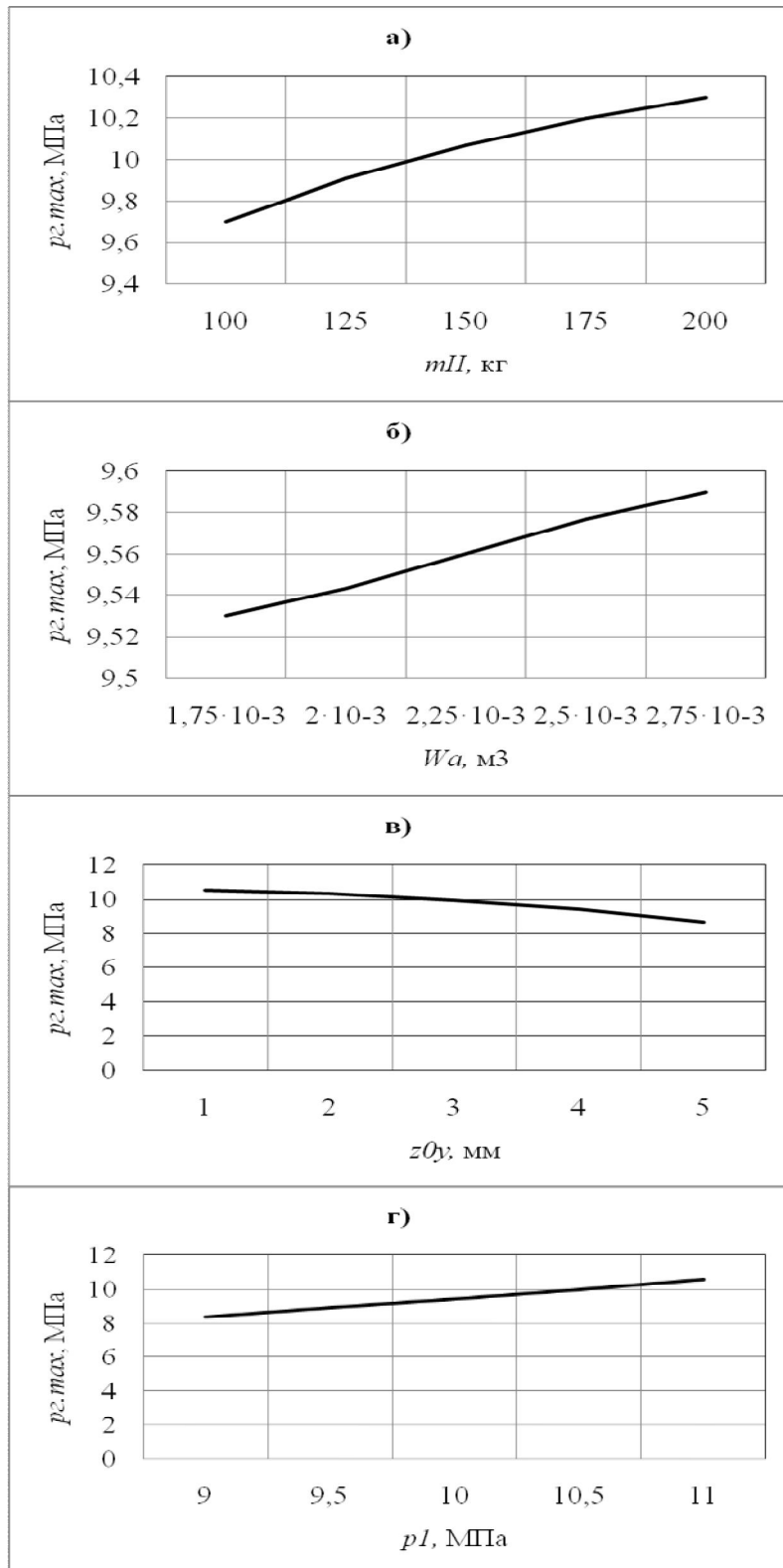


Рисунок 5.3 – Розрахункові залежності тиску $p_{2.max}$ у порожнині гідроциліндра ГП від маси m_{II} верхнього виконавчого елемента вібропреса (а), при $p_1 = 11$ МПа, $P_{cm} = 4$ кН, $W_a = 2 \cdot 10^{-3}$ м³, $z_{0y} = 1$ мм; робочого об'єму W_a гідроаккумулятора (б), при $P_{cm} = 4$ кН, $p_1 = 10$ МПа, $z_{0y} = 1$ мм, $m_{II} = 100$ кг; попереднього стискання z_{0y} пружин повернення вібростолу (в), при $P_{cm} = 4$ кН, $W_a = 2,75 \cdot 10^{-3}$ м³, $p_1 = 11$ МПа, $m_{II} = 100$ кг; та тиску p_1 відкриття віброзбуджувача (г), при $P_{cm} = 4$ кН, $W_a = 2 \cdot 10^{-3}$ м³, $z_{0v} = 1$ мм, $m_{II} = 100$ кг

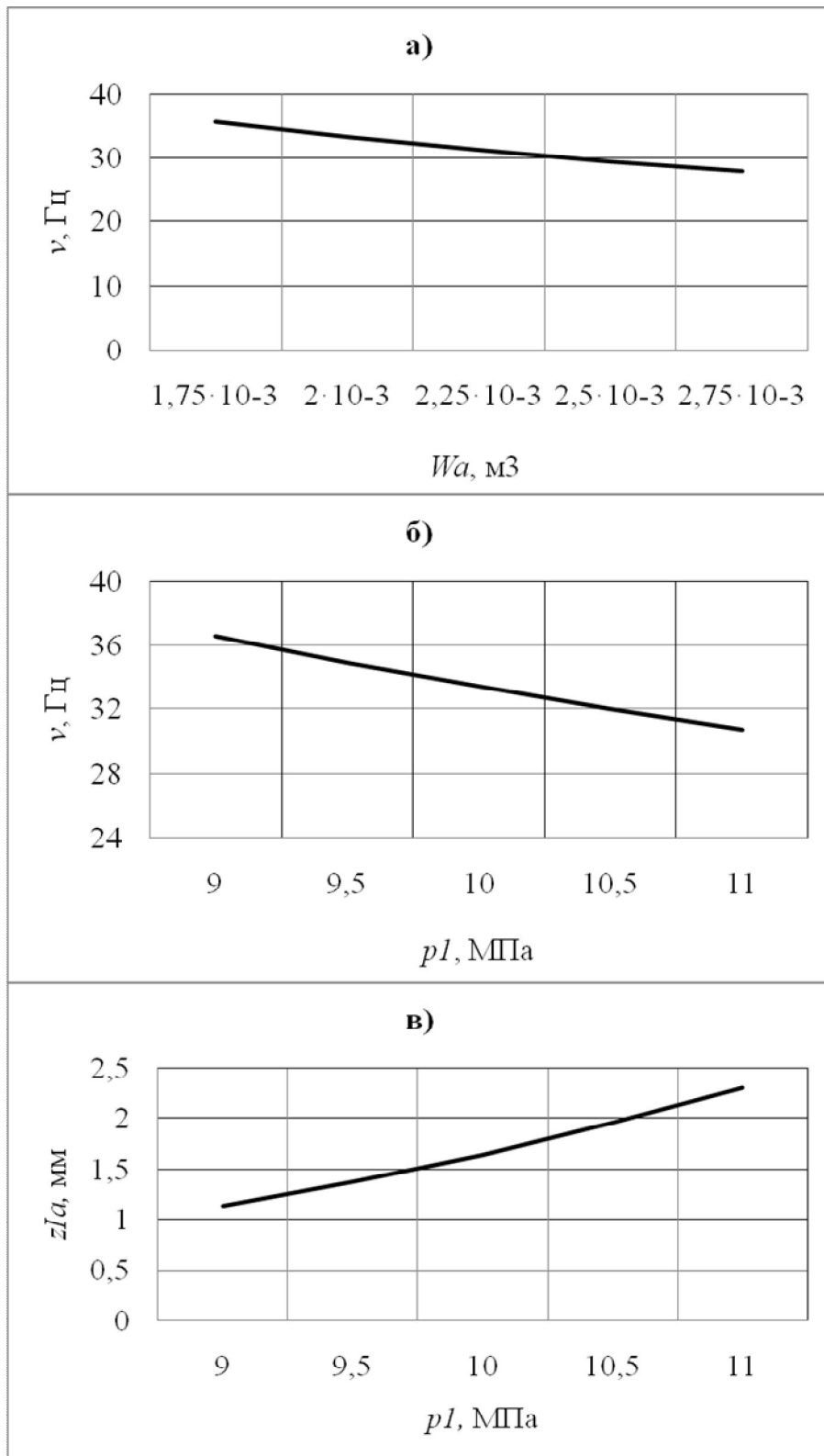


Рисунок 5.4 – Розрахункові залежності частоти ν коливань вібростолу гідроімпульсного вібропреса від робочого об'єму W_a гідроакумулятора (а), при $p_l = 10$ МПа, $P_{cm} = 4$ кН, $m_{II} = 100$ кг, $z_{0y} = 1$ мм; тиску p_l відкриття вібробуджувача (б) при $z_{0y} = 1$ мм, $P_{cm} = 4$ кН, $W_a = 2 \cdot 10^{-3}$ м³, $m_{II} = 100$ кг; в – розрахункова залежність амплітуди z_{la} коливань вібростолу від p_l , при $z_{0y} = 1$ мм, $P_{cm} = 4$ кН, $W_a = 2 \cdot 10^{-3}$ м³, $m_{II} = 100$ кг

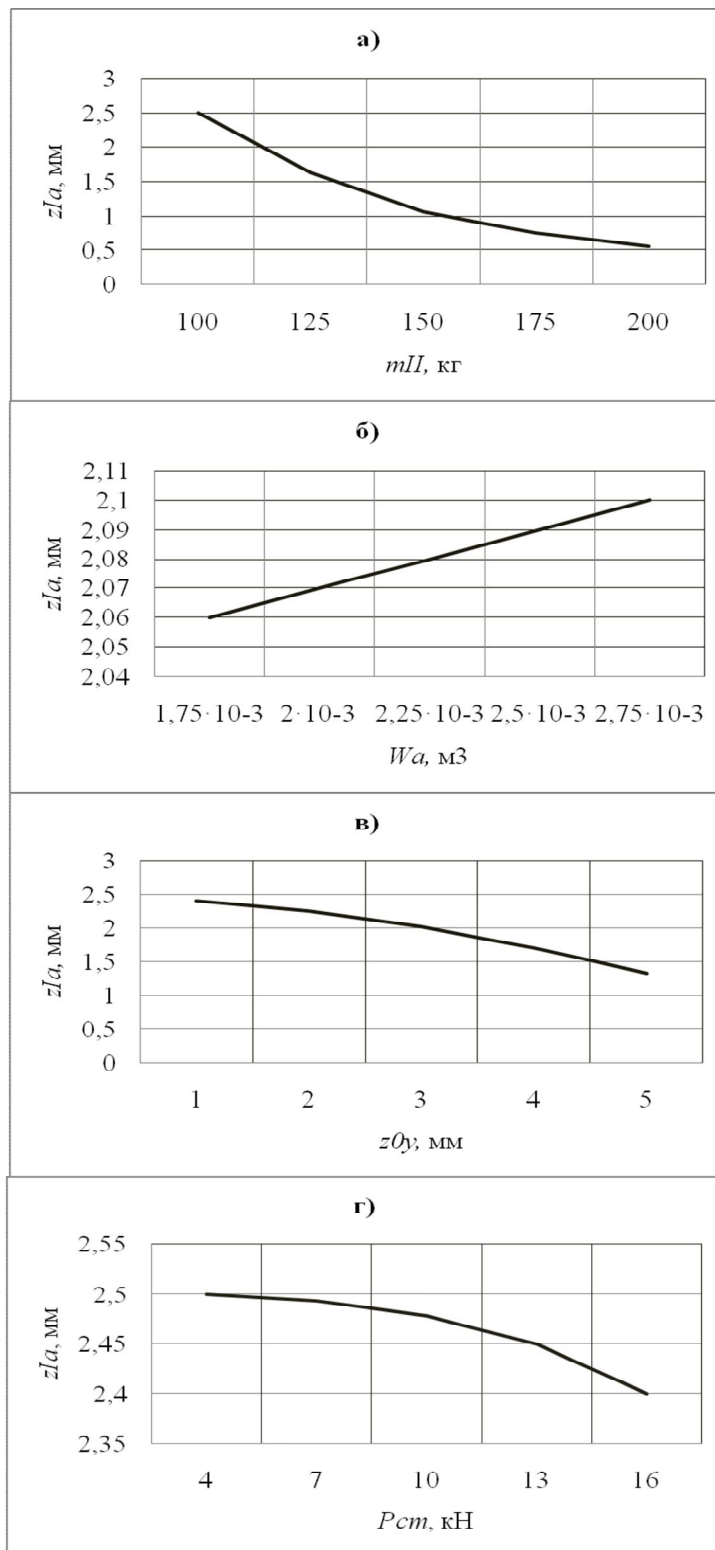


Рисунок 5.5 – Розрахункові залежності амплітуди z_{Ia} коливань вібростолу від маси m_{II} верхнього виконавчого елемента вібропреса (а), при $p_1 = 11$ МПа, $P_{cm} = 4$ кН, $W_a = 2 \cdot 10^{-3}$ м³, $z_{0y} = 1$ мм; робочого об'єму W_a гідроаккумулятора (б), при $P_{cm} = 4$ кН, $p_1 = 10$ МПа, $z_{0y} = 1$ мм, $m_{II} = 100$ кг; стискання z_{0y} пружин вібростолу (в), при $P_{cm} = 4$ кН, $W_a = 2,75 \cdot 10^{-3}$ м³, $p_1 = 11$ МПа, $m_{II} = 100$ кг; та зусилля P_{cm} притискання пуансона до порції матеріалів (г), при $p_1 = 11$ МПа, $W_a = 2,75 \cdot 10^{-3}$ м³, $z_{0y} = 1$ мм, $m_{II} = 100$ кг

6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТА гідроімпульсного обладнання ДЛЯ ВІБРОУДАРНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ ВОЛОГИХ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ

У даному розділі наведені основні результати експериментальних досліджень процесів та гідроімпульсного обладнання для віброударного зневоднення та фільтрування вологих дисперсних матеріалів [5], метою яких було обґрунтування коректності розроблених у розділах 4, 5 моделей.

6.1 Створення експериментального гідроімпульсного стенду для попереднього віброударного зневоднення

На рисунку 6.1 представлена схема експериментального гідроімпульсного стенду для попереднього віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів на базі вібропреса ІВПМ-16 [64] – прототипа вібропреса, досліджуваного у підрозділах 5.1 – 5.4. Будова і робочий цикл базового вібропреса докладно описані у підрозділі 2.1 та

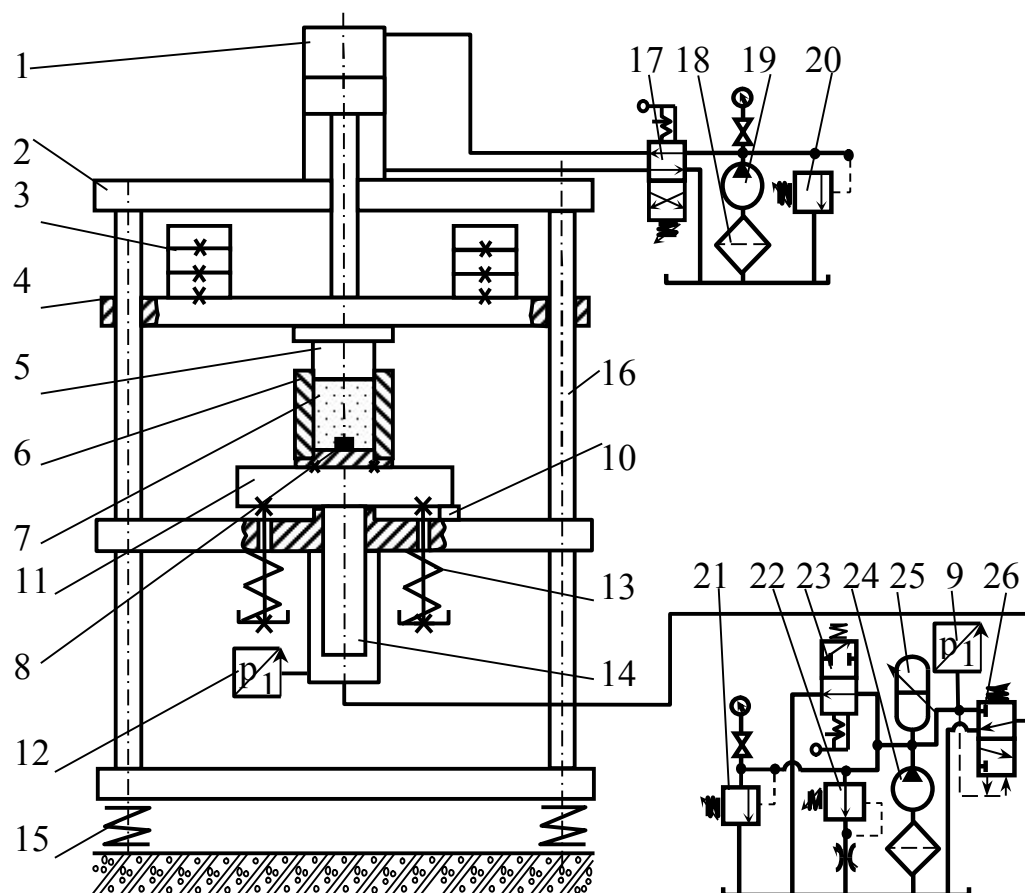


Рисунок 6.1 – Принципова гідро-кінематична схема експериментального гідроімпульсного стенду для попереднього віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів на базі вібропреса ІВПМ-16



Рисунок 6.2 – Фотографія технологічного оснащення експериментального гідроімпульсного стенду для попереднього віброударного зневоднення

зневоднення, вона не впливає на хід та робочі параметри процесу. На рисунку 6.2 представлена фотографія використовуваного під час експериментів технологічного оснащення.

Процес попереднього зневоднення на стенді (див. рисунок 6.1) здійснювався у такій послідовності. При відключеному ГПП вмикався допоміжний гідропривод, рухома траверса 4 з інерційними вантажами 3 та пуансоном 5 піднімались у верхнє положення. Порція вологого дисперсного матеріалу – попередньо зневодненого способом вільного стікання на ситі концентрату кавового шламу з початковою вологістю 75% - завантажувалась у мішечок з міцної і щільної синтетичної фільтрувальної тканини, що закладався у прес-форму 6. Далі рухома траверса 4 опускалась до установаження пуансона 5 на порцію 7; за допомогою допоміжного гідропривода, при необхідності, створювалось додаткове статичне притискання пуансона до оброблюваного матеріалу. Вмикався ГПП стенду. В результаті періодичного віброударного інерційного та статичного навантаження порції 7 матеріалу (див. підрозділ 5.1), рідинна фаза витискалась з них через тканину мішечка та отвори у прес-формі 6 назовні; тверда фаза затримувалась тканиною. По завершенню процесу попереднього віброударного зневоднення ГПП вимикався. Рухома траверса 4 з інерційними вантажами 3 та пуансоном 5 піднімались вверх. Мішечок з порцією зневодненого матеріалу виймався з прес-форми 6. Технічна характеристика експериментального гідроімпульсного стенда представлена у таблиці 2.1.

підрозділах 4.2 і 5.1, тому у даному підрозділі наводиться лише опис використовуваного на стенді (див. рисунок 6.1) технологічного оснащення, що являло собою прес-форму 6, закріплену на вібростолі 11 [191]. Прес-форма для полегшення вилучення з неї порції матеріалу після його зневоднення складається із днища та гільзи, в яких виконано велике число отворів діаметром 3 мм для відведення віджатої рідини. Отворів для періодичного підведення та відведення з прес-форми матеріалу (див. рисунки 3.3, 5.1) не було, через відсутність шнекового преса та стрічкового конвеєра для реалізації цих операцій (див. рисунок 6.1). Але оскільки заміна матеріалу у прес-формі повинна здійснюватись по завершенню його

6.2 Розробка програми експериментів

Метою експериментальних досліджень на даному етапі було підтвердження коректності розроблених у підрозділах 4.2, 4.3, 5.3 математичних моделей процесів та гідроімпульсного обладнання для попереднього віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів.

Для досягнення вказаної мети потрібно розв'язати такі задачі:

- вибрати контрольно-вимірювальну апаратуру для визначення робочих параметрів гідроімпульсного стенду (див. рисунок 6.1) та параметрів навантаження порції вологого дисперсного матеріалу під час його попереднього віброударного зневоднення на стенді, у прес-формі закритого типу (див. рисунок 6.2);
- отримати експериментальні залежності максимального зусилля $F_{mz\Sigma max}$ двостороннього навантаження, створюваного виконавчими елементами гідроімпульсного стенду на частинках порції вологого дисперсного матеріалу, від конструктивних та робочих параметрів стенду;
- зіставити експериментальні залежності для $F_{mz\Sigma max}$ з відповідними, отриманими для аналогічних режимів вібропреса-прототипа розрахунковими залежностями, показаними на рисунку 4.13 й у випадку прийнятності розбіжностей довести, таким чином коректність наведених у підрозділах 4.2, 4.3 залежностей та рівнянь математичних моделей досліджуваних процесів;
- одержати експериментальні залежності параметрів навантаження вологих дисперсних матеріалів (максимального тиску $p_{z,max}$ у порожнині гідроциліндра ГПІ стенду, частоти ν і амплітуди z_{Ia} коливань його вібростолу - див. пункт 2.2.4 та підрозділ 5.3), від конструктивних та робочих параметрів гідроімпульсного стенду;
- порівняти дані залежності з відповідними розрахунковими залежностями (див. рисунки 5.3 – 5.5), одержаними для аналогічних режимів вібропреса-прототипа й у випадку прийнятності розбіжностей зробити висновок про коректність, розроблених у підрозділі 5.3 математичних моделей гідроімпульсного обладнання для віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів.

6.3 Вибір контрольно-вимірювальної апаратури

У ході проведених експериментів вимірювались: тиск робочої рідини p_a у акумуляторній гідролінії гідроімпульсного стенду (див. рисунок 6.1), тиск p_z у порожнині гідроциліндра 14 ГПІ, вертикальні переміщення z_I вібростолу 11 та зусилля $F_{mz\Sigma}$ двостороннього навантаження порції 7 вологого дисперсного матеріалу (див. підрозділ 4.2 та додаток Б).

Для контролю тисків p_a , p_z застосовувались датчики 9 і 12 (див. рисунок 6.1) – обидва тензометричного типу [209, 210], моделей ADZ-SML-

10.0 та KOBOLD SEN 8701-165; для вимірювання $F_{mz\Sigma}$ – тензометричний датчик моделі EMS70 [211]; для визначення z_I – тензометричний датчик 10 моделі TURCK Ni8-M18-LiU. За осцилограмою z_I можуть бути визначені частота ν і амплітуда z_{Ia} коливань вібростолу 11. У роботі [5] представлені фотографії, схеми приєднання та основні технічні характеристики вказаних датчиків.

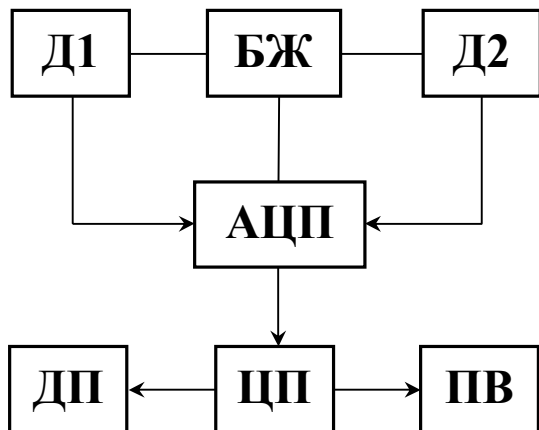


Рисунок 6.3 – Схема використовуваного під час експериментів контрольно-вимірювального комплексу:

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;
 БЖ – блок живлення;
 Д1, Д2 – тензометричні датчики;
 ДП – друкууючий пристрій;
 ПВ – пристрій відображення;
 ЦП – центральний процесор

апаратури і сигналів датчиків;

- тарування датчиків;
- закріплення датчиків на експериментальному гідроімпульсному стенді;
- проведення попередніх контрольних вимірювань.

Електронна обробка вихідного сигналу дозволяє забезпечити його мінімальну похибку, а саме 0,2 - 1%, а також тривалий термін роботи комплексу [214, 215]. Схеми підключення та тарувальні графіки датчиків, контрольно-вимірювального комплексу, отримані після корегування вихідного сигналу, - наведені у роботі [5]; там же представлена фотографія пресового пристрою, використовуваного під час тарування тензометричних датчиків тиску. Тарування датчика зусилля здійснювалось за допомогою лабораторного преса моделі ПММ-125 та динамометра стискання ДАЦ-С-500 [216].

На рисунку 6.3 наведена схема використовуваного під час експериментів контрольно-вимірювального комплексу, до складу якого входили: АЦП – аналого-цифровий перетворювач сигналів моделі Е14-140 [212, 213]; БЖ – блок живлення; Д1, Д2 – датчики тиску та переміщення; ЦП – центральний процесор ПК; ПВ – пристрій візуалізації отриманого сигналу (монітор); ДП – друкууючий пристрій (принтер). Технічні характеристики та фотографія АЦП Е14-140 детально представлені у роботі [5].

Для підготовки контрольно-вимірювального комплексу до експериментів були виконані такі роботи:

- з'єднання датчиків кабелями з блоком живлення та АЦП;
- заземлення та настройка

Живлення датчиків забезпечувалось від джерела постійного струму з робочою напругою 24 В, розміщеного в екранованому металевому захищеному корпусі, на передню стінку якого винесені роз'єми для підключення датчиків.

Оскільки вихідні сигнали тензодатчиків тиску та зусилля є струмовими їх приєднання до контрольно-вимірювального комплексу здійснювалось за схемою «струмова петля» [214, 215]. Такі схеми підключення дозволяють виконувати вимірювання за напругою, а отже забезпечують сумісність датчиків з АЦП [212, 217]. Для отримання «чистого» сигналу при підключенні датчиків використовувався двопровідний екранований мідний кабель, екранувальна обмотка якого приєднувалась до загального заземлювального контуру АЦП [213, 214].

Для вимірювання змінного сигналу та виведення обробленої аналогової інформації у контрольно-вимірювальному комплексі задіявся аналогово-цифровий перетворювач Е14-140, що відрізняється надійністю, точністю та стабільністю показань. Даний 14-ти розрядний пристрій, в сукупності з багатоканальним комутатором вхідних сигналів забезпечував здійснення вимірювань за двома каналами (залежно від схеми підключення кількість каналів даного перетворювача може варіюватись від 1 до 16 або 32), з використанням [212, 213]. Керування роботою АЦП здійснювалось від персонального комп'ютера, підключення до якого забезпечувалось через стандартний USB-порт.

Особливістю АЦП моделі Е14-140 є його експлуатаційні характеристики, які відповідають вимогам роботи з динамічними параметрами (співвідношення сигнал/шум, нерівномірність амплітудно-частотної характеристики, ширина динамічного діапазону). В платі АЦП розташований цифровий сигнальний процесор, внутрішня структура якого оптимізована для реалізації цифрової фільтрації, спектрального аналізу тощо, який використовується також й для управління всіма периферійними пристроями плати [212, 213].

З метою зменшення шумового фону сигналів датчиків, вільні канали АЦП з'єднувались із загальною "землею" [209, 214].

Для роботи з контрольно-вимірювальним комплексом було використано стандартне програмне забезпечення АЦП Е14-140, а саме програмний пакет LGraph2 [218].

Також використовувались тензометричні датчики тиску, установлені у порожнинах вібробуджувача ГІП.

6.4 Експериментальне обґрунтування коректності математичних моделей процесів віброударного зневоднення

На рисунку 6.4 наведені осцилограми зміни тисків робочої рідини в акумуляторній гідролінії - p_a , у гідроциліндрі ГІП - p_g , а також

переміщення z_I вібростолу експериментального гідроімпульсного стенда (див. рисунок 6.1), одержані для одного з його робочих режимів, з

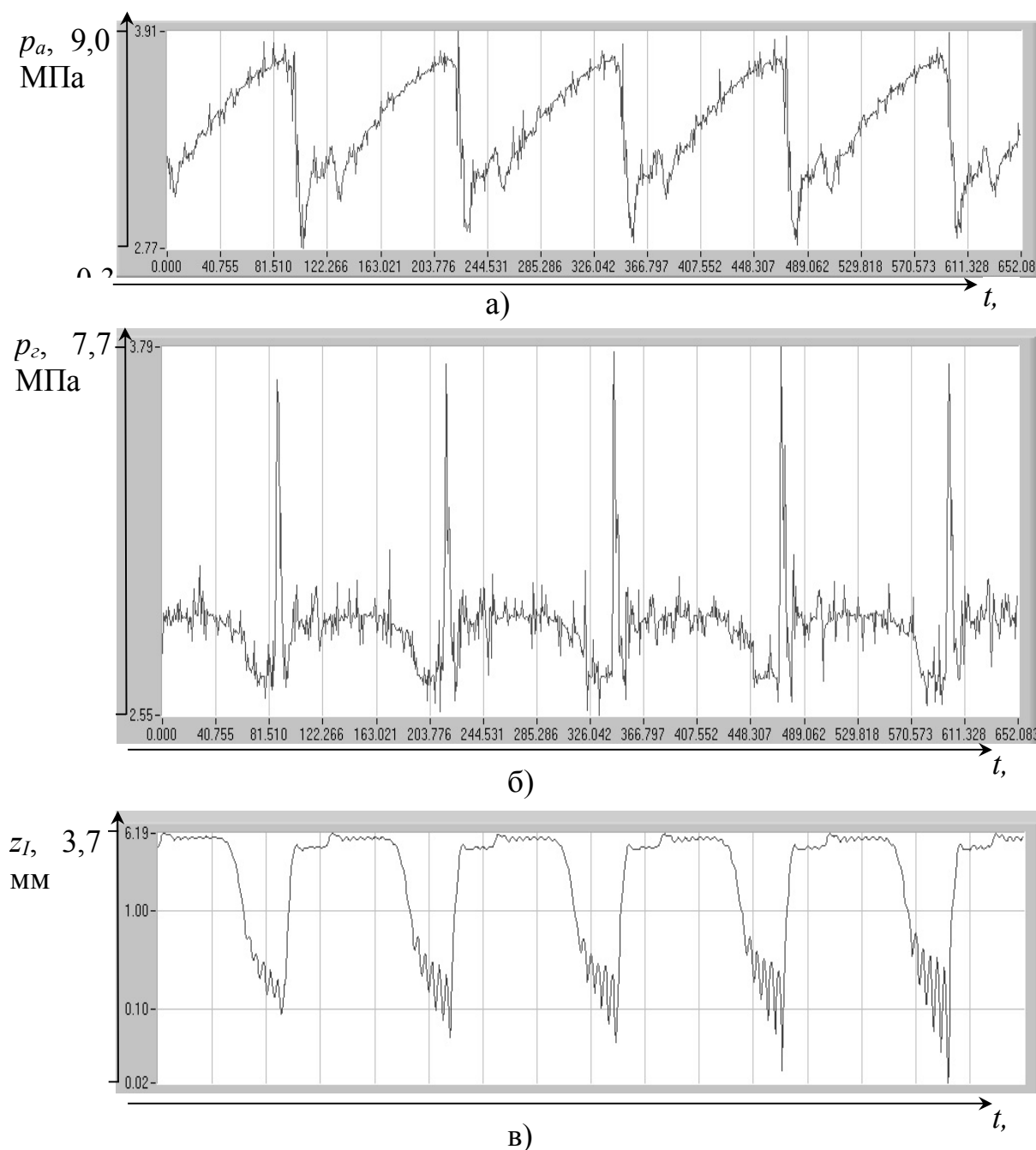


Рисунок 6.4 – Осцилограми зміни: а - тиску p_a робочої рідини у акумуляторній гідролінії; б - тиску p_2 робочої рідини у гідроциліндрі ГІП; в – переміщення z_I вібростолу гідроімпульсного стенда при віброударному зневодненні на ньому порції концентрату кавового шламу

використанням описаного у попередньому підрозділі та у роботі [5] контрольно-вимірювального комплексу, при зневодненні порції концентрату кавового шламу. Крім цього, на стенді при незмінних режимах навантаження здійснювалось зневоднення порцій бурякового

жому і спиртової барди, що мали таку саму як і шлам початкову вологість: $U_n=75\%$. При цьому осцилограми p_a , p_z , z_I та експериментальні залежності $F_{mz\Sigma}$, $p_{z,max}$, v і z_{Ia} від конструктивних та робочого параметрів стенду, під час зневоднення на ньому шламу, жому і барди, були цілком адекватними. Тому, у подальшому наводяться тільки залежності для процесів віброударного зневоднення кавового шламу.

З метою одержання достовірних експериментальних значень $F_{mz\Sigma}$, p_z , p_a та z_I , кількість n необхідних вимірювань-записів кожного з режимів визначалась за формулою [220, 221]

$$n \geq \frac{1 + P_\delta + 2 \cdot n_{\delta id}}{1 - P_\delta}, \quad (6.1)$$

де $n_{\delta id}$ – число вимірювань, що відкидаються; P_δ – довірна імовірність того, що похибка визначення параметра знаходиться в допустимих межах.

За рекомендаціями [214] довірна імовірність при нормуванні квантільної оцінки результуючої і випадкової похибки вимірювальної техніки вибирається з інтервалу 0,8 . . . 0,9.

Тоді при $n_{\delta id} = 0$

$$n \geq \frac{1 + 0,8 \dots 0,9}{1 - 0,8 \dots 0,9} = 9 \dots 10. \quad (6.2)$$

Відповідно до теореми Ляпунова [221], випадкова похибка вимірювань повинна бути розподілена за законом, близьким до нормального. Тому для знаходження справжнього значення обмірюваного на осцилограмі параметра і його середньої квадратичної похибки застосовувалися залежності [214]

$$a \cong \bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}; \quad \sigma \cong \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}, \quad (6.3)$$

де x_i - обмірювана величина параметра; \bar{x} - середнє арифметичне обмірюваної величини.

Згідно [209], результуюча (повна) похибка визначення величини параметра складається із систематичних і випадкових похибок контрольно-вимірювального тракту (див. рисунок 6.3). Для вимірювального тракту датчик – АЦП – центральний процесор – принтер – осцилограма – тарувальний графік – параметр середньоквадратичне значення результуючої похибки можна розрахувати за формулою [214]

$$\gamma_k = \sqrt{\gamma_\delta^2 + \gamma_{aun}^2 + \gamma_{np}^2 + \gamma_{o,z}^2}, \quad (6.4)$$

де γ_0 - похибка датчика; $\gamma_{\text{цп}}$ - сумарна похибка АЦП; $\gamma_{\text{пр}}$ - сумарна похибка принтера; $\gamma_{0,2}$ - похибка вимірювання параметра за осцилограмою і тарувальним графіком.

Складові результуючої середньої квадратичної похибки вимірювань прийняті за рекомендаціями [202, 203, 212, 214, 222], (див. також таблицю Д.1):

- для тензOMETричних датчиків тиску p_2, p_a робочої рідини $\pm 0,5\%$;
- для тензOMETричного датчика зусилля $F_{\text{мз}\Sigma} \pm 0,2\%$;
- для тензOMETричного датчика переміщень $z_I \pm 1\%$;
- сумарна похибка АЦП $\pm 0,5\%$;
- сумарна похибка принтера $\pm 0,7\%$;
- відносна похибка при вимірюванні параметрів за осцилограмою $\pm 5\%$.

Обчислена по формулою (6.4) сумарна похибка при вимірюванні складає: тисків p_2, p_a робочої рідини $\pm 5,1\%$; зусилля $F_{\text{мз}\Sigma} \pm 5,08\%$; переміщень $z_I \pm 5,17\%$, що задовольняє вимогам, які пред'являються до контрольно-вимірювальної та реєструвальної апаратури, а також до технічних вимірювань при дослідженнях ГП [210, 219, 223].

На рисунку 6.5 зіставлені розрахункові (див. рисунок 4.13) та експериментальні графіки залежностей максимального значення зусилля $F_{\text{мз}\Sigma}$ від основних робочих та конструктивних параметрів гідроімпульсного стенду при адекватних робочих режимах [5]. Конструктивними та робочим параметрами стенду є: попереднє стискання z_{0y} пружин повернення вібростолу, маса m_{II} верхнього виконавчого елемента, робочий об'єм W_a гідроакумулятора та тиск p_I відкриття вібробуджувача ГП.

Визначення максимальної відносної величини розбіжностей δ між відповідними розрахунковими і експериментальними значеннями $F_{\text{мз}\Sigma}$ здійснювалося за відомою формулою

$$\delta = \left| \frac{a_m - a_e}{a_e} \right| 100\%, \quad (6.6)$$

де a_m і a_e - відповідно теретичне й експериментальне значення параметра.

Значення δ складають: для залежності $F_{\text{мз}\Sigma} - z_{0y} - 7,2\%$; для залежності $F_{\text{мз}\Sigma} - p_I - 2,9\%$; для залежності $F_{\text{мз}\Sigma} - W_a - 5,9\%$; для залежності $F_{\text{мз}\Sigma} - m_{II} - 5,4\%$, що задовольняє умовам перевірних розрахунків [220, 224].

Таким чином, основні рівняння та залежності розробленої теорії процесів віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів (див. підрозділи 4.2, 4.3) можна вважати експериментально перевіреними і доведеними, а прийняті при цьому допущення і спрощення – обґрунтованими.

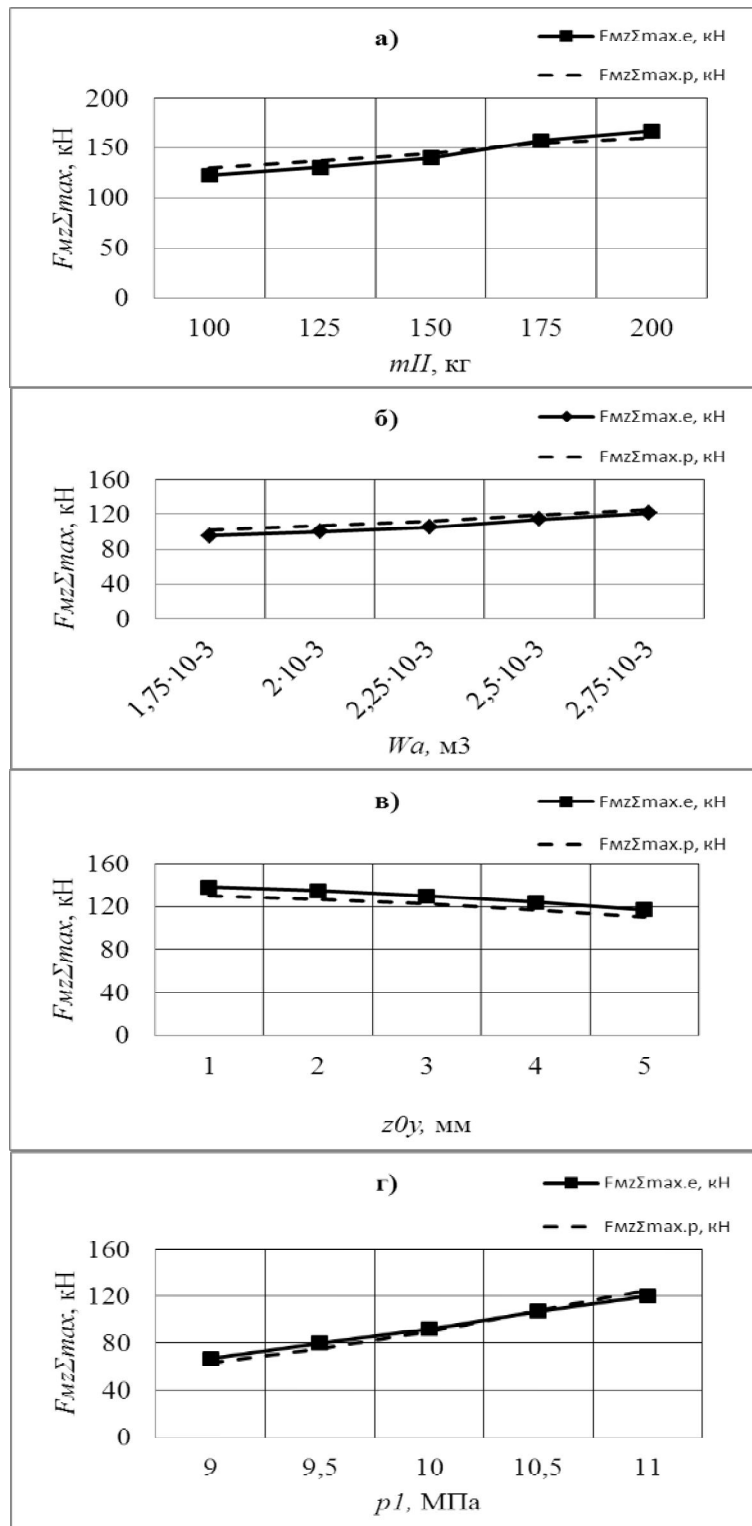


Рисунок 6.5 – Зіставлення розрахункових та експериментальних залежностей зусилля $F_{mz\Sigma}$ віброударного навантаження матеріалів від: маси m_{II} вібропреса (а), при $p_1 = 11$ МПа, $P_{cm} = 4$ кН, $W_a = 2 \cdot 10^{-3}$ м³, $z_{0y} = 1$ мм; об'єму W_a гідроаккумулятора (б), при $P_{cm} = 4$ кН, $p_1 = 10$ МПа, $z_{0y} = 1$ мм, $m_{II} = 100$ кг; стискання z_{0y} пружин вібростолу (в), при $P_{cm} = 4$ кН, $W_a = 2,75 \cdot 10^{-3}$ м³, $p_1 = 11$ МПа, $m_{II} = 100$ кг; та тиску p_1 відкриття віброзбуджувача (г), при $P_{cm} = 4$ кН, $W_a = 2 \cdot 10^{-3}$ м³, $z_{0y} = 1$ мм, $m_{II} = 100$ кг

6.5 Одержання експериментальних залежностей параметрів навантаження під час віброударного зневоднення та зіставлення їх з відповідними розрахунковими залежностями

Одержання експериментальних залежностей параметрів навантаження під час попереднього віброударного зневоднення від основних конструктивних та робочих параметрів гідроімпульсного стенда (див. рисунок 6.1) та зіставлення цих залежностей з відповідними розрахунковими залежностями, одержаними для тих же самих режимів вібропреса-прототипа (див. рисунки 5.3 – 5.5) дозволять перевірити адекватність, розроблених у підрозділах 5.2, 5.3 динамічних та математичних моделей.

З цією метою використовувались той самий, що й на попередній стадії експериментів контрольний-вимірювальний комплекс (див. підрозділ 6.3), а також методика одержання та обробки експериментальних даних (див. підрозділ 6.4).

На рисунках 6.6 – 6.8 зіставлені розрахункові та експериментальні залежності параметрів навантаження під час попереднього віброударного зневоднення від конструктивних та робочих параметрів гідроімпульсних вібропреса та стенда для відповідних режимів їх роботи [5].

При цьому максимальні відносні величини розбіжностей δ (див. формулу (6.6)) між відповідними розрахунковими і експериментальними значеннями склали: для залежності $p_{z.max} - z_{0y} - 6,6\%$; для залежності $p_{z.max} - p_1 - 4,2\%$; для залежності $p_{z.max} - W_a - 2,1\%$; для залежності $p_{z.max} - m_{II} - 2,8\%$; для залежності $v - p_1 - 6,2\%$; для залежності $v - W_a - 11,1\%$; для залежності $z_{Ia} - z_{0y} - 11,3\%$; для залежності $z_{Ia} - p_1 - 8\%$; для залежності $z_{Ia} - W_a - 4,5\%$; для залежності $z_{Ia} - m_{II} - 8,7\%$; для залежності $z_{Ia} - P_{cm} - 3,3\%$, що задовольняє умовам перевірних розрахунків [220, 224]. Таким чином, можна зробити висновок, що розроблені у підрозділах 5.2, 5.3 динамічні та математичні моделі гідроімпульсного вібропреса для попереднього віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів є адекватними його реальному прототипу. Отже, дані математичні моделі можуть послужити основою для розробки методики проектного розрахунку досліджуваного гідроімпульсного обладнання.

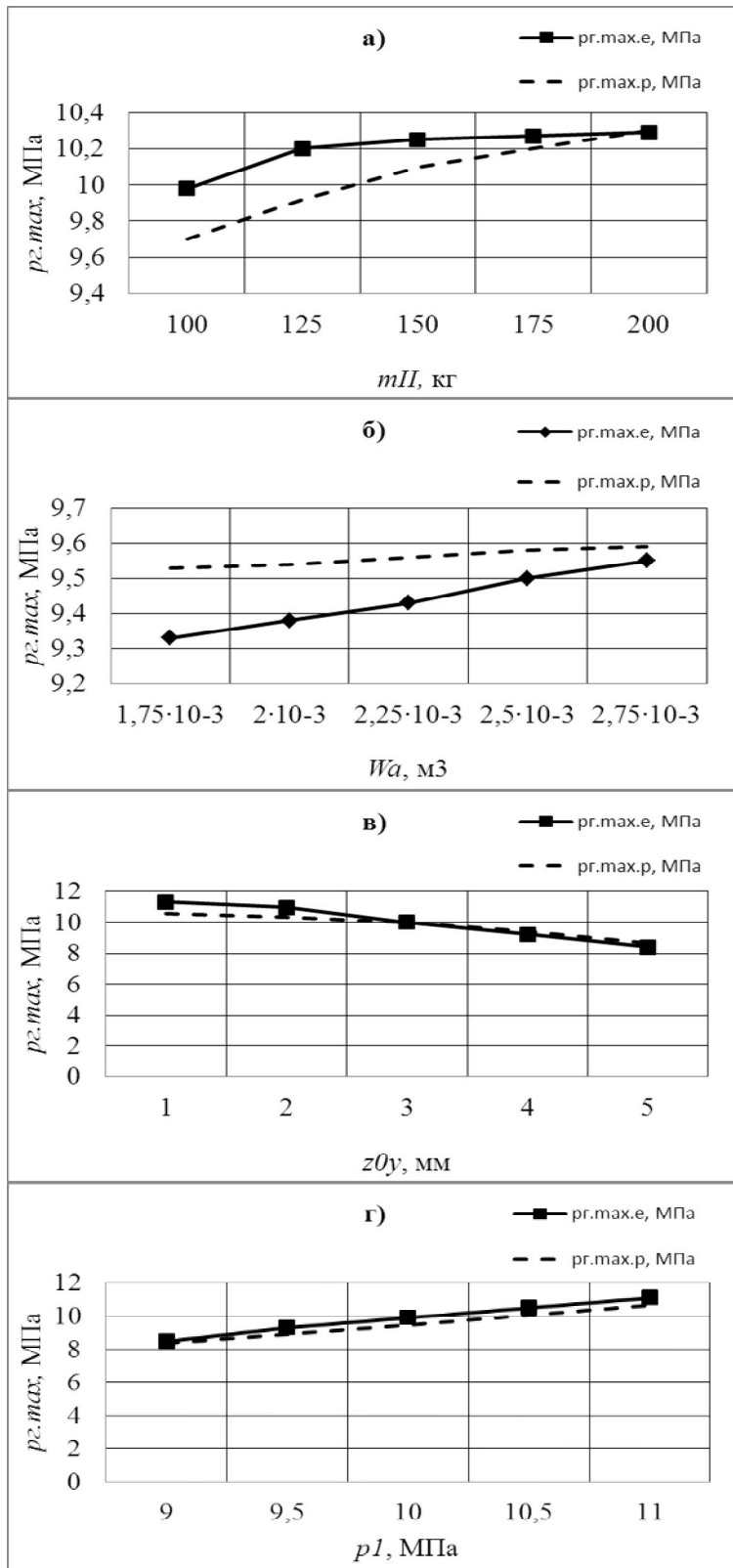


Рисунок 6.6 – Зіставлення розрахункових та експериментальних залежностей тиску $p_{z.max}$ від: маси m_{II} вібропреса (а), при $p_I = 11$ МПа, $P_{cm} = 4$ кН, $W_a = 2 \cdot 10^{-3}$ м³, $z_{0y} = 1$ мм; об'єму W_a гідроаккумулятора (б), при $P_{cm} = 4$ кН, $p_I = 10$ МПа, $z_{0y} = 1$ мм, $m_{II} = 100$ кг; стискання z_{0y} пружин вібростолу (в), при $P_{cm} = 4$ кН, $W_a = 2,75 \cdot 10^{-3}$ м³, $p_I = 11$ МПа, $m_{II} = 100$ кг; та тиску p_I відкриття (г), при $P_{cm} = 4$ кН, $W_a = 2 \cdot 10^{-3}$ м³, $z_{0y} = 1$ мм, $m_{II} = 100$ кг

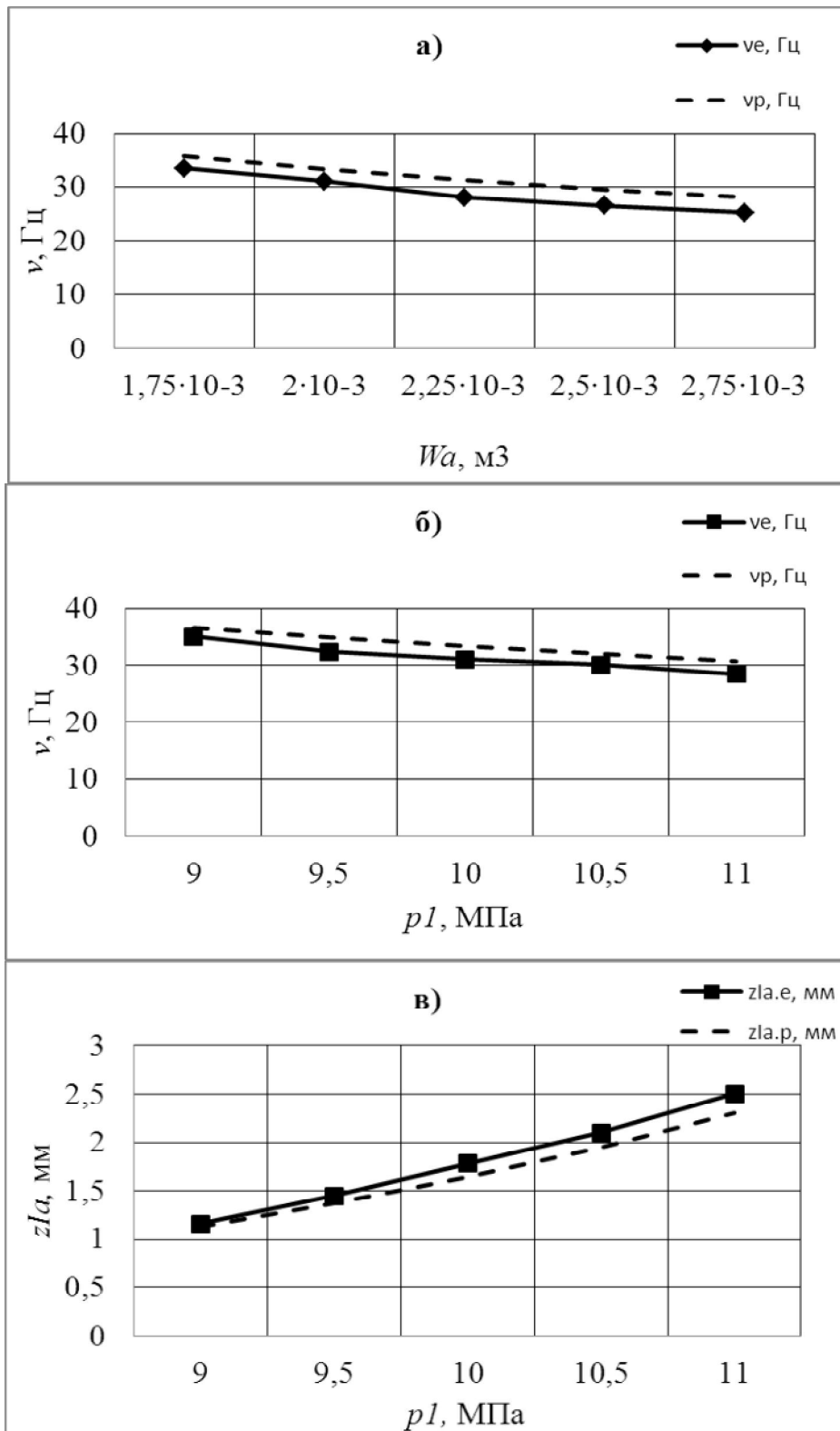


Рисунок 6.7 – Зіставлення розрахункових та експериментальних залежностей частоти ν коливань вібростолу гідроімпульсного вібропреса від: робочого об'єму W_a гідроаккумулятора (а), при $p_1 = 10$ МПа, $P_{cm} = 4$ кН, $m_{II} = 100$ кг, $z_{0y} = 1$ мм; тиску p_1 відкриття вібробуджувача (б) при $z_{0y} = 1$ мм, $P_{cm} = 4$ кН, $W_a = 2 \cdot 10^{-3}$ м³, $m_{II} = 100$ кг; в – зіставлення залежностей амплітуди z_{la} коливань вібростолу від p_1 , при $z_{0y} = 1$ мм, $P_{cm} = 4$ кН, $W_a = 2 \cdot 10^{-3}$ м³, $m_{II} = 100$ кг

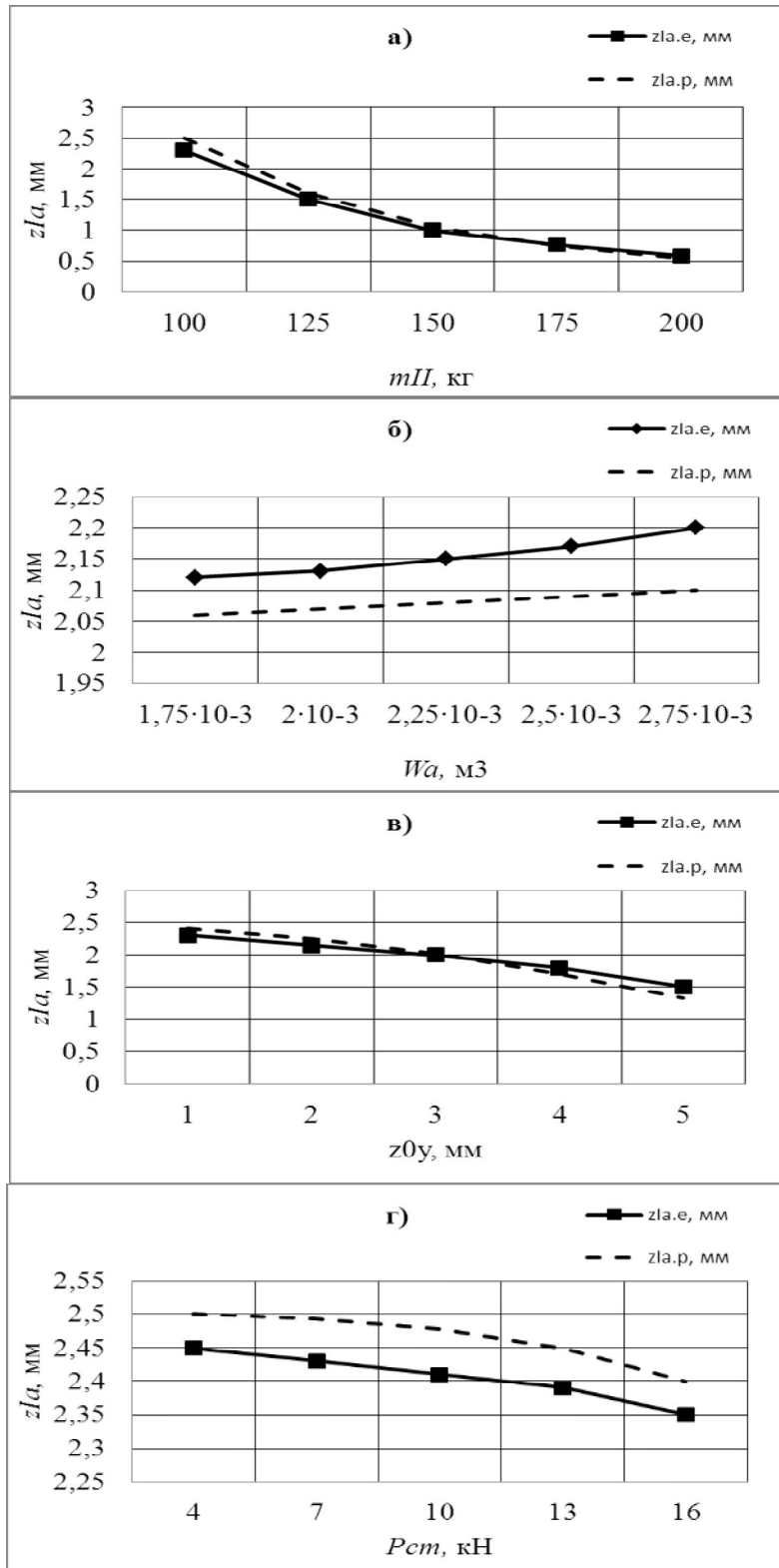


Рисунок 6.8 – Зіставлення розрахункових та експериментальних залежностей амплітуди z_{la} від: маси m_{II} вібропреса (а), при $p_l = 11$ МПа, $P_{cm} = 4$ кН, $W_a = 2 \cdot 10^{-3}$ м³, $z_{0y} = 1$ мм; робочого об'єму W_a гідроаккумулятора (б), при $P_{cm} = 4$ кН, $p_l = 10$ МПа, $z_{0y} = 1$ мм, $m_{II} = 100$ кг; попереднього стискання z_{0y} пружин вібростолу (в), при $P_{cm} = 4$ кН, $W_a = 2,75 \cdot 10^{-3}$ м³, $p_l = 11$ МПа, $m_{II} = 100$ кг; та зусилля P_{cm} притискання пуансона до порції матеріалу (г), при $p_l = 11$ МПа, $W_a = 2,75 \cdot 10^{-3}$ м³, $z_{0y} = 1$ мм, $m_{II} = 100$ кг

7 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТНОГО РОЗРАХУНКУ ТА ПЕРСПЕКТИВНИХ СХЕМ гідроімпульсного обладнання ДЛЯ ВІБРОУДАРНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ ВОЛОГИХ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ

7.1 Розробка методики проектного розрахунку гідроімпульсних вібропресів для віброударного зневоднення

Під час розробки методики проектного розрахунку гідроімпульсних вібропресів для віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів [5, 225] використані рівняння та залежності математичних моделей досліджуваних процесів та обладнання [166, 167] (див. підрозділи 4.2, 4.3, 5.3), а також досвід проектування й експлуатації гідроімпульсного вібропресового обладнання іншого технологічного призначення [64, 65, 219].

Наведена методика, розроблена для визначення основних конструктивних параметрів гідроімпульсного вібропреса для попереднього віброударного зневоднення на базі вібропреса ІВПМ (див. рисунки 3.3, 5.1) [5].

Основними вихідними даними для проектного розрахунку є:

- маса $m_{м.д}$ вологого дисперсного матеріалу, що має бути зневодненим на проектуваному гідроімпульсному вібропресі у продовж доби, а також загальна тривалість $\Sigma T_{з.д}$ його роботи за цей же самий період;
- максимальні параметри навантаження вологого дисперсного матеріалу: тиск $p_{г.мах}$ у порожнині гідроциліндра ГІП вібропреса, амплітуда $z_{1а}$ і частота ν коливань вібростолу (див. пункт 2.2.2 та підрозділи 4.2, 5.3), від яких в найбільшій мірі залежать параметри ефективності досліджуваних процесів (продуктивність $П_{з.р}$ за видаленою рідиною, енергоємність E_3 та кінцева вологість U_k концентрату матеріалу – див. також рисунки 2.4 – 2.6); крім цього, потрібно задати максимальний необхідний перепад тиску $\Delta p_{м.мах}$ у середовищі матеріалу;
- число каскадів, схема розподілення та тип конструктивного виконання запірних елементів вібророзбуджувача ГІП [64], тиски його відкриття p_1 і закриття p_2 , швидкодія $t_в$ [64] та тривалість $t_о$ відкриття (див. підрозділи 4.2, 5.3), ширина перекриття $h_{о.з}$ та площа поперечного перерізу $S_{о.з}$ основного золотника [64];
- параметри робочої рідини - густина $\rho_{р.р}$, модуль об'ємної пружності $K_{р.р}$ [205], процентний вміст рідини W_p та нерозчиненого повітря W_z [195], рівень $h_б$ робочої рідини у баку та збільшення Δt_p її робочої температури;
- параметри вологого дисперсного матеріалу - густина ρ_m , коефіцієнти жорсткості - c_{mz} , c_{pz} та в'язкого демпфірування - α_{mz} , α_{pz} твердої і рідинної фаз відносно осі z , коефіцієнт текучості – σ_{0z} твердих частинок (див. підрозділ 5.2 та додаток Б).

- В результаті розрахунку визначаються такі параметри вібропреса як:
- маси вібростолу - $m_в$, рухомої траверси - $m_{p.m}$ та інерційних вантажів - $m_{i.в}$ (див. рисунок 5.1);
 - маса $m_{n.ф}$ та розміри ($B_{n.ф.в}$, $B_{n.ф.з}$, B_o , $H_{n.ф.в}$, $H_{n.ф.з}$, H_o) прес-форми (див. нижче);
 - діаметр плунжера гідроциліндра ГП - d_2 ;
 - жорсткість пружин повернення вібростолу - c_y ;
 - робочий об'єм одноциклового рідинного гідроаккумулятора ГП - W_a ;
 - подача насоса ГП - Q_{nl} ;
 - потужність електродвигуна ГП - N_{el} .

Велика частина розрахунку має перевірений характер.

Результати досліджень, проведених за допомогою експериментального гідроімпульсного стенду, представленого на рисунку 6.1 (див. також підрозділ 6.1) показали, що для одержання достатньо низької кінцевої вологості дисперсного матеріалу (концентрату кавового шламу) $U_k = 55\%$, за прийнятних $P_{з.м}$, $P_{з.р}$ та $\epsilon_з$, оптимальна тривалість $\Sigma T_{з.о}$ його попереднього віброударного зневоднення повинна складати не менше 30 с.

Приблизно такий самий час буде витратиться на піднімання та опускання рухомої траверси вібропреса після зневоднення чергової порції вологого дисперсного матеріалу у прес-формі (див. підрозділи 3.1, 5.1 та рисунки 3.3, 5.1), на її витискання шнековим пресом та завантаження наступної порції. Тоді кількість порцій вологого дисперсного матеріалу, що мають бути зневоднені на вібропресі у продовж доби визначаємо як

$$n_{n.д} = \frac{\Sigma T_{з.д}}{2 \cdot \Sigma T_{з.о}}. \quad (7.1)$$

Тоді маса порції

$$m_m = \frac{m_{m.д}}{n_{n.д}}. \quad (7.2)$$

Досвід проектування та експлуатації гідроімпульсних вібропресів різного призначення [64, 199] дозволяє зробити висновок про те, що при використанні в їх основному приводі насосів з робочим об'ємом до 100 см³, а також віброзбуджувачів відомих схем приєднання, для яких вже розроблена методика проектного розрахунку, конструкція та підібрані розміри і шорсткості поверхонь складових деталей [65], - ширина вібростолу $B_в$ обладнання не повинна перевищувати 1 м.

Приймаємо для реалізації попереднього віброударного зневоднення прес-форму квадратного поперечного перерізу, з прямокутними вхідним і вихідним отворами для підведення і відведення оброблюваного матеріалу (див. рисунки 3.3, 5.1), ширина B_o яких відповідає ширині порожнини прес-форми - $B_{n.ф.в}$. При такій її конструкції вся маса матеріалу в середині буде без затримок, рівномірно проходити від вхідного до вихідного отвору, не накопичуючись у внутрішній порожнині.

Зовнішню ширину $B_{n.ф.з}$ прес-форму приймаємо рівною: $B_{n.ф.з} = 0,96 B_o$, а $B_{n.ф.в} = B_o = 0,94 B_o$.

Ширину B_m порції приймаємо рівною $B_{n.ф.в}$, а висоту H_m розраховуємо як

$$H_m = \frac{m_m}{\rho_m B_{n.ф.в}^2}. \quad (7.3)$$

Висоту H_o вхідного і вихідного отворів у прес-формі приймаємо рівними H_m . Внутрішню висоту $H_{n.ф.в}$ прес-форми за умови забезпечення надійного перекриття її верхнього перерізу приймаємо на 30 мм більшою за H_o , а зовнішню висоту $H_{n.ф.з}$ обчислюємо як: $H_{n.ф.з} = 1,04 \cdot H_{n.ф.в}$.

Масу $m_{n.ф}$ прес-форми визначаємо за її попередньо визначеними розмірами, з врахуванням густини $\rho_{ст}$ сталі (див. таблицю 7.1).

Під час обчислення маси плунжера гідروциліндра ГП - m_z та вібростолу - m_v для попереднього розрахунку можна використовувати значення відповідних параметрів базового вібропресу [64] (див. рисунки 2.1, 3.3, 6.1). Аналогічно визначаються геометричні параметри об'єму ГП, що акумулює: $l_0, d_0, f_0, \delta_0, l_{2.a}, d_{2.a}, f_{2.a}, \delta_{2.a}, l_a, d_a, S_a, \delta_a, W_a$ (тут l – довжина, d – діаметр, f – площа поперечного перерізу, δ – товщина стінки відповідної гідролінії або порожнини). У ході подальшого розрахунку ці параметри можуть корегуватись.

Масу m_l розраховуємо як (див. підрозділ 5.2): $m_l = m_z + m_v + m_{n.ф} + m_m$.

Далі за формулами (4.14 – 4.16) обчислюють середній модуль об'ємної пружності $K_{p.ср}$ робочої рідини у об'ємі $W_{a.o}$, що акумулює на етапі зарядки гідроакумулятора (див. підрозділи 4.2, 5.2), зведений модуль пружності $K_{зв.a.o}$ даного об'єму та величину $W_{a.o}$ [195].

Необхідна максимальна подача насоса ГП визначається частотою ν [64] (див. формулу (5.40))

$$Q_{nlmax} = \frac{W_{a.o} (p_1 - p_2) \nu}{(1 - \nu \cdot t_o) K_{зв.a.o}}. \quad (7.4)$$

Далі вибираємо значення $l_l, d_l, f_l, \delta_l, l_k, d_k, f_k, \delta_k, \zeta_{ex1}, \zeta_{ex2}, \lambda_l, \lambda_k$ (див. рисунок 5.1 та підрозділ 5.1).

Ударні підвищення тисків $\Delta p_{y\partial.k}$, $\Delta p_{y\partial.l}$ робочої рідини у каналі 22 (див. також рисунок 5.1) і гідролінії 14, відповідні величини напівфаз ударних хвиль - $t_{i.k}$, $t_{i.l}$ та тривалість t_n проходження хвилі від входу у канал 22 до порожнини гідроциліндра ГП [205], визначаємо за формулами (4.18, 4.19, 5.8 – 5.12). При цьому середні швидкості робочої рідини у каналі 22 - $v_{к.р}$ та гідролінії 14 - $v_{l.p}$ (див. підрозділ 5.3) обчислюємо як

$$v_{к.р} = \frac{Q_{a.c.p.}}{f_k}; v_{l.p} = \frac{Q_{a.c.p.}}{f_l}. \quad (7.5)$$

У формулах (7.5) $Q_{a.c.p.}$ – середні витрати робочої рідини, що надходить з гідроаккумулятора у продовж періоду його розрядки, обчислюємо, виходячи з величини потенціальної енергії $E_{n.a}$, що накопичується у об'ємі $W_{a.o}$ (див. підрозділ 5.3)

$$E_{n.a} = \frac{(p_1^2 - p_2^2)W_{a.o}}{2 \cdot K_{зв.a.o}}; Q_{a.c.p.} = \frac{2E_{n.a}}{t_o(p_1 - p_2)}. \quad (7.6)$$

Вибираємо значення l_3 , d_3 , f_3 , δ_3 , l_4 , d_4 , f_4 , δ_4 , l_5 , d_5 , f_5 , δ_5 , а також довжину $l_{n.d}$, діаметр $d_{n.d}$, площу $S_{d.z}$, об'єм $W_{n.d}$ та товщину δ_d стінок поршневої порожнини допоміжного гідроциліндра, товщину $\delta_{n.f}$ стінок прес-форми: $\delta_{n.f} = \frac{B_{n.f.z} - B_{n.f.e}}{2}$, зусилля P_{cm} статичного притискання пуансона до порції вологого дисперсного матеріалу, коефіцієнти місцевих опорів $\zeta_{в.д.з}$, $\zeta_{зв.з2}$, $\zeta_{зв.з}$, $\zeta_{зв.к2}$ і коефіцієнти гідравлічного тертя $\lambda_{n.d}$, λ_3 , λ_4 у підсистемі допоміжного гідропривода вібропреса (див. рисунок 5.1 та підрозділ 5.1).

Зведена маса верхнього виконавчого елемента вібропреса за відсутності статичного притискання P_{cm} пуансона до порції вологого дисперсного матеріалу – m_{I36} та за наявності такого притискання – m_{I36}' - визначається за формулами (5.21).

Жорсткість c_y пружин вібростолу розраховується з умови забезпечення розвантаження порції вологого дисперсного матеріалу від дії осьового пресового зусилля за формулою [226]

$$c_y \leq \frac{P_{cm}(0,75 \cdot m_I - 0,25 \cdot m_{I36})}{m_{I36} \cdot z_{0y}}, \quad (7.7)$$

де z_{0y} – величина попереднього стискання пружин вібростолу (див. підрозділ 5.3).

Максимальна тривалість імпульсного силового впливу на плунжер гідроциліндра ГП $t_3 = t_{il}$ (див. підрозділ 5.3).

Діаметр плунжера гідроциліндра ГП визначаємо за допомогою залежності, одержаної з формули (5.46)

$$d_2 = 2 \sqrt{\frac{\Delta p_{m.max} \cdot S_m + c_y(z_{0y} + z_{In}) + \alpha_2 v_{In} + \frac{m_I v_{In} - m_{II36} v_{IIIn}}{t_3}}{-(\lambda_{\partial.36} + \zeta_{\partial.36}) v_{IIIn}^2 - \alpha_{\partial.2} \cdot v_{IIIn} - c_{\partial.36} \cdot z_{IIIn} - R_{\partial.2} - 2 \cdot P_{cm}}} / \pi \cdot p_{z.max}, \quad (7.8)$$

де z_{In} , z_{IIIn} , v_{In} , v_{IIIn} – переміщення та швидкості виконавчих елементів вібропреса у момент часу $t = t_3$ (див. підрозділ 5.3);

α_2 , $\alpha_{\partial.2}$ – коефіцієнти в'язкого демпфірування в з'єднаннях плунжера гідроциліндра ГП, а також поршня і штока допоміжного гідроциліндра [64], що визначаються за формулами (5.26 – 5.28), з використанням залежностей (4.15, 4.16);

$\lambda_{\partial.36}$, $\zeta_{\partial.36}$, $c_{\partial.36}$ – зведені коефіцієнти гідравлічного тертя, місцевих опорів та жорсткості у підсистемі допоміжного привода [195] (див. формули (5.22, 5.27, 5.28, 4.15, 4.16));

$R_{\partial.2}$ – постійна складова зведених сил сухого тертя в ущільненнях допоміжного гідроциліндра [205], яку наближено можна обчислити за залежністю (5.30) [64].

При цьому ударний тиск $\Delta p_{y\partial II}$ ($\Delta p_{y\partial II}'$) у порожнині гідроциліндра ГП (див. підрозділ 5.3) визначається таким чином (див. формули (5.45))

$$\Delta p_{y\partial II} = p_{z.max} - p_3; \quad \Delta p_{y\partial II}' = p_{z.max}' - p_3; \quad (7.9)$$

Поточне переміщення z_{IIIn} можна знайти за формулою (5.48), але, якщо розглядати останній цикл віброударного навантаження порції вологого дисперсного матеріалу, під час якого його зневоднення та ущільнення практично завершені, можна прийняти $z_{IIIn} = z_{In}$ (див. підрозділ 5.3).

Для визначення v_{In} , v_{IIIn} застосовуємо рівняння балансів енергії (5.38) та рівняння збереження імпульсів (5.39) з підстановкою (5.16 - 5.18, 5.4).

Величину z_{In} , в свою чергу, обчислюємо за залежністю

$$z_{In} = z_{Ia} - z_{Ie}, \quad (7.10)$$

що отримана з формули (5.49), з підстановкою (5.50, 5.51).

Отримане за формулою (7.8) значення d_2 округляємо до найближчого більшого зі стандартного ряду.

Потужність електродвигуна ГП визначається як [64, 226]

$$N_{eI} = Q_{nI \max} p_1 \frac{1 - p_2 / p_1}{\eta_n \eta_e \eta_m}, \quad (7.11)$$

де η_n, η_e, η_m - ККД насоса, електродвигуна і муфти, відповідно [226, 195].

На основі запропонованої методики може бути розроблена комп'ютерна програма проектного розрахунку основних конструктивних та робочих параметрів гідроімпульсного вібропреса для попереднього віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів. Блок-схема алгоритму програми представлена у таблиці 7.1 [5].

Таблиця 7.1 – Блок-схема алгоритму проектного розрахунку конструктивних та робочих параметрів гідроімпульсного вібропреса для попереднього віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів

Вибір вихідних даних: $m_{m.\partial}, \Sigma T_{3.\partial}, \Sigma T_{3.o}, p_{z.\max}, \Delta p_{m.\max}, p_1, p_2, t_o, t_b, \nu, z_{1a}, \rho_{p.p}, K_{p.p}, W_p, W_z, h_b, \Delta t_p, \rho_m, K_m, \sigma_{0z}, c_{mz}, c_{pz}, \alpha_{mz}, \alpha_{pz}, p_0, K_{cm}, B_b, \rho_{cm}$
Розрахунок: $n_{n.\partial} = \frac{\Sigma T_{3.\partial}}{2 \cdot \Sigma T_{3.o}}; (7.1) m_m = \frac{m_{m.\partial}}{n_{n.\partial}}; (7.2) B_{n.\phi.3} = 0,96 B_b;$ $B_{n.\phi.6} = B_o = 0,94 B_b; H_m = \frac{m_m}{\rho_m B_{n.\phi.6}^2}; (7.3).$ Визначення: $H_o = H_m; H_{n.\phi.6} = H_m$ + + 0,03 м; $H_{n.\phi.3} = 1,04 \cdot H_{n.\phi.6}; B_m = B_{n.\phi.6};$ $m_{n.\phi} = (B_{n.\phi.3}^2 \cdot H_{n.\phi.3} - B_{n.\phi.6}^2 \cdot H_{n.\phi.6}) \rho_{cm}.$
Вибір: $m_z, m_b, l_0, d_0, f_0, \delta_0, l_{z.a}, d_{z.a}, f_{z.a}, \delta_{z.a}, l_a, d_a, S_a, \delta_a, W_a$
Розрахунок: $K_{p.a1} = \frac{K_{p.p} \left(\frac{W_p}{W_z} + 1 \right)}{\frac{W_p}{W_z} + K_{p.p} \frac{p_0}{p_1^2}}; K_{p.a2} = \frac{K_{p.p} \left(\frac{W_p}{W_z} + 1 \right)}{\frac{W_p}{W_z} + K_{p.p} \frac{p_0}{p_2^2}} \quad (4.15)$ $K_{p.a.cp} = \frac{K_{p.a1} + K_{p.a2}}{2}; W_{a.o} = l_0 \cdot f_0 + l_{z.a} \cdot f_{z.a} + W_a;$ $K_0 = \frac{K_{cm} \cdot \delta_0}{d_0}; K_{z.a} = \frac{K_{cm} \cdot \delta_{z.a}}{d_{z.a}}; K_a = \frac{K_{cm} \cdot \delta_a}{d_a}; \quad (4.16)$ $K_{3в.а.о} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{p.a.cp}} + \frac{1}{K_0} + \frac{1}{K_{z.a}} + \frac{1}{K_a} \right)}; (4.14) Q_{nI \max} = \frac{W_{a.o} (p_1 - p_2) \nu}{(1 - \nu \cdot t_o) K_{3в.а.о}}. \quad (7.4)$

Вибір: $l_1, d_1, f_1, \delta_1, l_k, d_k, f_k, \delta_k, \zeta_{ex1}, \zeta_{ex2}, \lambda_1, \lambda_k$

$$\text{Розрахунок: } \rho_{p.p.t} = \frac{\rho_{p.p}}{1 + 8 \cdot 10^{-4} \Delta t_p}; (4.19) E_{n.a} = \frac{(p_1^2 - p_2^2) W_{a.o.}}{2 \cdot K_{зв.a.o.}};$$

$$Q_{a.cp} = \frac{2E_{n.a}}{t_o(p_1 - p_2)}; (7.6) v_{k.p} = \frac{Q_{a.cp}}{f_k}; v_{1p} = \frac{Q_{a.cp}}{f_1}; (7.5)$$

$$\Delta p_{ex1} = \rho_{p.p.t} \cdot \zeta_{ex1} \frac{v_{k.p}^2}{2}; \Delta p_{m.k} = \rho_{p.p.t} \cdot \lambda_k \frac{l_k}{f_k} \frac{v_{k.p}^2}{2}; (5.9)$$

$$\Delta p_{ex2} = \rho_{p.p.t} \cdot \zeta_{ex2} \frac{v_{1p}^2}{2}; \Delta p_{m1} = \rho_{p.p.t} \cdot \lambda_1 \frac{l_1}{f_1} \frac{v_{1p}^2}{2}; (5.9)$$

$$p_3 = \rho_{p.p.t} \cdot g \cdot h_0; (4.18)$$

$$\Delta p_{y\delta.k} = p_1 - p_3 - \Delta p_{ex1} - \Delta p_{m.k}; \Delta p_{y\delta l} = \Delta p_{y\delta.k} - \Delta p_{ex2} - \Delta p_{m1}; (5.8)$$

$$K_{p.3} = \frac{K_{p.p} \left(\frac{W_p}{W_2} + 1 \right)}{\frac{W_p}{W_2} + K_{p.p} \frac{p_0}{p_3^2}}; (4.15)$$

$$c_k = \frac{\Delta p_{y\delta.k}}{\rho_{p.p.t} \cdot v_{k.p}}; c_l = \frac{\Delta p_{y\delta l}}{\rho_{p.p.t} \cdot v_{1p}}; (5.11) t_n = \frac{l_k}{c_k} + \frac{l_l}{c_l}; (5.10)$$

Вибір: $l_3, d_3, f_3, \delta_3, l_4, d_4, f_4, \delta_4, l_5, d_5, f_5, \delta_5, l_{n.\delta}, d_{n.\delta}, S_{\delta.2}, W_{n.\delta}, \delta_\delta, P_{cm}, \zeta_{\delta.\delta.2}, \zeta_{зв.32}, \zeta_{зв.3}, \zeta_{зв.k2}, \lambda_{n.\delta}, \lambda_3, \lambda_4$, попередній вибір S_2 Розрахунок: $m_I = m_2 +$

$$m_6 + m_{n.\phi} + m_M; m_{II36} = m_{II} + \frac{1}{3} \rho_{p.p.t} \cdot S_2^2 \left(\frac{W_{n.\delta}}{S_{\delta.2}^2} + \frac{l_4}{f_4} + \frac{l_3}{f_3} \right); (5.21)$$

$$c_y \leq \frac{P_{cm} (0,75 \cdot m_I - 0,25 \cdot m_{II36})}{m_{II36} \cdot z_{0y}}; (7.7) t_3 = \frac{l_1}{c_1}; p_H = \frac{P_{cm}}{S_{\delta.2}};$$

$$K_{p.\delta} = \frac{K_{p.p} \left(\frac{W_p}{W_2} + 1 \right)}{\frac{W_p}{W_2} + K_{p.p} \frac{p_0}{p_H^2}}; (4.15) \delta_{n.\phi} = \frac{B_{n.\phi.3} - B_{n.\phi.6}}{2};$$

$$K_{\delta.2} = \frac{K_{cm} \cdot \delta_\delta}{d_{n.\delta}}; K_3 = \frac{K_{cm} \cdot \delta_3}{d_3}; K_4 = \frac{K_{cm} \cdot \delta_4}{d_4}; (4.16)$$

$$c_{n.\partial.36} = \frac{S_{\partial.2}^2 \cdot K_{p.\partial} \cdot K_{\partial.2}}{W_{n.\partial} \cdot (K_{p.\partial} + K_{\partial.2})}; c_{436} = \frac{S_{\partial.2}^2 \cdot K_{p.\partial} \cdot K_4}{l_4 \cdot f_4 \cdot (K_{p.\partial} + K_4)}; \quad (5.28)$$

$$c_{336} = \frac{S_{\partial.2}^2 \cdot K_{p.\partial} \cdot K_3}{l_3 \cdot f_3 \cdot (K_{p.\partial} + K_3)}; \quad (5.28) \quad c_{\partial.36} = \frac{1}{\frac{1}{c_{n.\partial.36}} + \frac{1}{c_{436}} + \frac{1}{c_{336}}}; \quad (5.27)$$

$$\alpha_2 = 2 \cdot \beta \cdot \sqrt{c_y \cdot m_I}; \quad \alpha_{\partial.2} = 2 \cdot \beta \cdot \sqrt{c_{\partial.36} \cdot m_{II36}}; \quad (5.26)$$

$$\lambda_{36.\partial} = \lambda_{n.\partial} \frac{1}{2} W_{n.\partial} \sqrt{\frac{\pi}{S_{\partial.2}^3}} + \lambda_4 \frac{l_4}{f_4} + \lambda_3 \frac{l_3}{f_3}; \quad \zeta_{36.\partial} = \zeta_{6.\partial.2} + \zeta_{36.32} + \zeta_{363} + \zeta_{36.\kappa 2}; \quad (5.22)$$

$$\Delta p_{y\partial 11} = p_{2.max} - p_3; \quad (7.9) \quad R_{\partial.2} = 0,1 \cdot S_2 \Delta p_{y\partial 11}; \quad (5.30)$$

$$K_{p.y1} = \frac{K_{p.p} \left(\frac{W_p}{W_2} + 1 \right)}{\frac{W_p}{W_2} + K_{p.p} \frac{P_0}{(\Delta p_{y\partial 1} + p_3)^2}}; \quad (4.15) \quad m_{I p.36} = \frac{d_2^4}{3 \cdot d_1^4} \rho_{p.p.1} \cdot l_1 \cdot f_1; \quad (5.4, 5.17)$$

З рівнянь:

$$\frac{m_{I p.36} \left(v_{I p}^2 - v_{In}^2 \frac{S_2^2}{f_1^2} \right)}{2} + \frac{l_1 \cdot f_1 (\Delta p_{y\partial 1}^2 - \Delta p_{y\partial 11}^2) (K_{p.y1} + K_1)}{2 \cdot K_{p.y1} \cdot K_1} =$$

$$= \frac{m_I \cdot v_{In}^2}{2} + \frac{m_{II36} \cdot v_{II n}^2}{2} (1 + \lambda_{36.\partial} + \zeta_{36.\partial}) + \frac{c_y \cdot z_{0y}^2}{2}; \quad (5.16, 5.18, 5.38)$$

$$t_3 (S_2 \cdot \Delta p_{y\partial 11} - c_y \cdot z_{0y}) = m_I \cdot v_{In} + m_{II36} v_{II n} (1 + \lambda_{36.\partial} + \zeta_{36.\partial}) \quad (5.39)$$

- визначаємо v_{In} , $v_{II n}$

З рівнянь

$$a_1 = \left(\alpha_2 \cdot v_{In} + c_y (z_{0y} + z_{In} + z_{I6}) + (\lambda_{36.\partial} + \zeta_{36.\partial}) v_{In}^2 + \right) / \left(2 \cdot m_I + \frac{m_{II36} g + P_{cm}}{m_I} + g \right); \quad (5.51)$$

$$+ \alpha_{\partial.2} \cdot v_{In} + c_{\partial.36} \cdot z_{II n} + R_{\partial.2} - S_2 (p_{2.max} + p_2)$$

$$z_{I6} = \frac{v_{In}^2}{2 \cdot a_1}; \quad (5.50) \quad z_{In} = z_{Ia} - z_{I6}; \quad (7.10) \text{- визначаємо } z_{In}.$$

Розраховуємо:

$$d_2 = 2 \sqrt{\frac{\left(\Delta p_{m.max} \cdot S_m + c_y (z_{0y} + z_{In}) + \alpha_2 v_{In} + \frac{m_I v_{In} - m_{II36} v_{II n}}{t_3} \right)}{\left(-(\lambda_{\partial.36} + \zeta_{\partial.36}) v_{II n}^2 - \alpha_{\partial.2} \cdot v_{II n} - c_{\partial.36} \cdot z_{II n} - R_{\partial.2} - 2 \cdot P_{cm} \right)}} / \pi \cdot p_{2.max}; \quad (7.8)$$

та округлюємо його до найближчого більшого стандартного значення.

$$\text{Вибираємо } \eta_n, \eta_e, \eta_m \text{ та розраховуємо } N_{e1} = Q_{n1max} p_1 \frac{1 - p_2 / p_1}{\eta_n \eta_e \eta_m}. \quad (7.11)$$

7.2 Розробка перспективних схем гідроімпульсного обладнання для віброударного зневоднення

На рисунку 7.1 показаний гідроімпульсний вібропрес для зневоднення вологих дисперсних матеріалів з карусельним навантажувачем-розвантажувачем на базі вібропреса моделі ІВІМ-16 [64] (див. рисунки 1.8, 2.1, 6.1). Базовий вібропрес вже достатньо описаний у підрозділах 1.1 та 2.1, але для підвищення продуктивності зневоднення на ньому вологих дисперсних матеріалів доцільно збільшити розміри вібростолу 5 та пуансона 1, який за формою і площею поперечного перерізу має відповідати вібростолу. Виконавчим елементом вузла завантаження-розвантаження вологого дисперсного матеріалу є три однакові піддони 9 з кульковими напрямними 4 та з великим числом дрібних наскрізних отворів, закритих фільтрувальною сіткою (на схемі не показані). Піддони 9 із зазором входять у пази рамок 3, що з однієї сторони жорстко прикріплені до кронштейнів 17. Кронштейни, в свою чергу, спираються на нижній бурт втулки 14, крім цього, пов'язані з її верхнім буртом за допомогою важелів 16 та штифтів 15 (останні входять у отвори у кронштейнах 17, важелях 16 та втулці 14). Втулка 14 спирається на підшипник 13 і завдяки цьому має можливість повертатись навколо колонни 24 станини 21 вібропреса.

Вібропрес передбачається використовувати таким чином. Перед початком, зневоднення рухоми траверсу 19 з інерційними вантажами 20 та пуансоном 1, за допомогою допоміжного гідроциліндра 18, піднімають у верхнє положення. Концентрат попередньо зневодненого до вологості 70% вологого дисперсного матеріалу знаходиться у бункері 8 з висувним днищем 10. Під час завантаження під днищем 10, на столі 11 установлюється одна з трьох рамок 3, із вставленим в неї порожнім піддоном 9 (періодичні повороти втулки 14 з рамками 3 і піддонами 9 здійснюються вручну оператором, що обслуговує вібропрес). Днище 10 за допомогою рукоятки (на схемі не показана) повністю висувається з бункера 8, а після завантаження піддону – засувається на місце; в такий спосіб забезпечується рівномірний шар вологого дисперсного матеріалу на піддоні товщиною 10 – 20 мм. Втулка повертається на кут 120°, при цьому завантажений піддон припіднімається оператором на 10 - 20 мм і установлюється на вібростіл 5. Траверса 19 з інерційними вантажами 20 опускається вниз до установлення пуансона 1 на порції 2 вологого

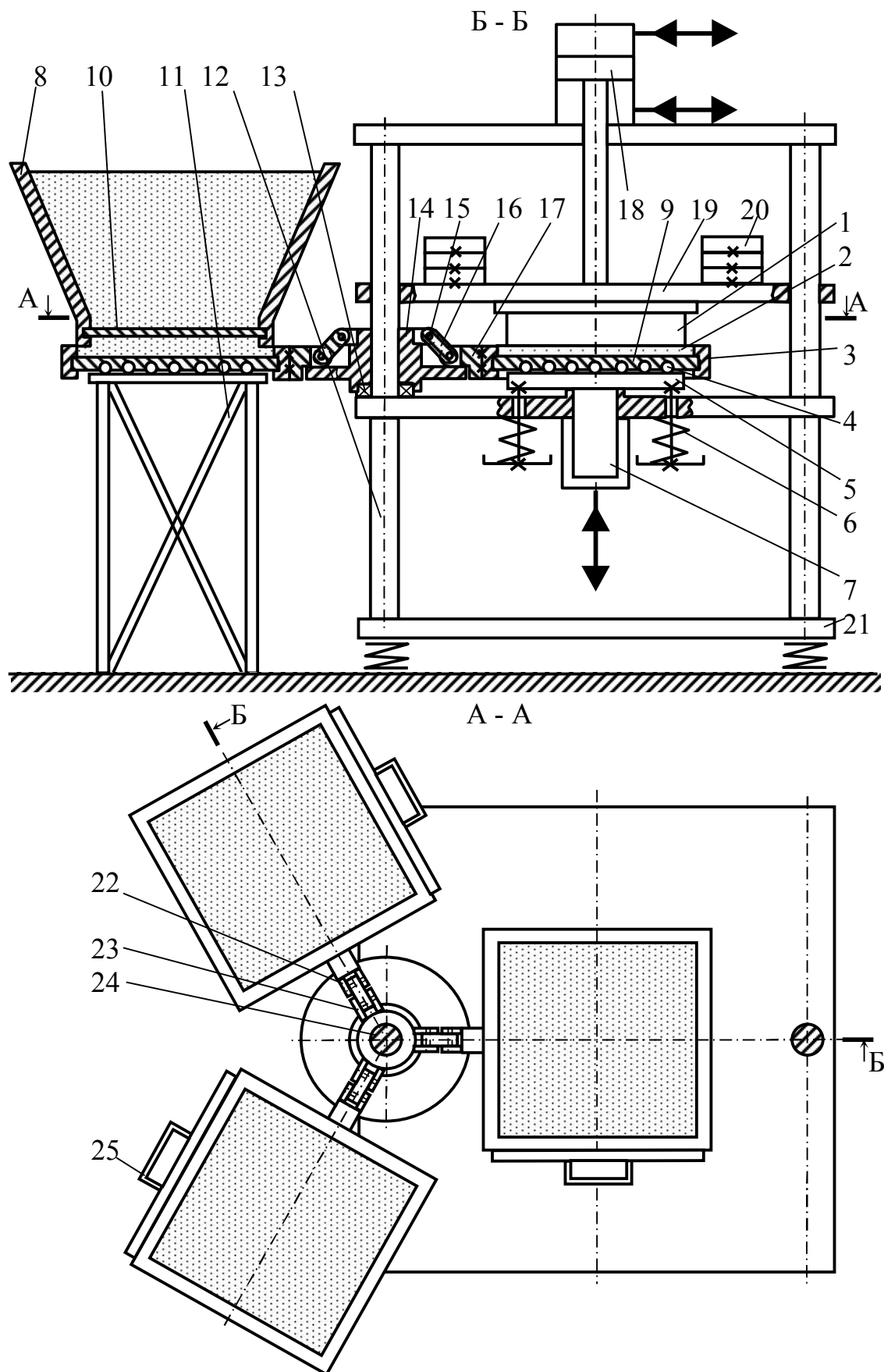


Рисунок 7.1 – Конструктивна схема гідроімпульсного вібропреса для зневоднення вологих дисперсних матеріалів з карусельним навантажувачем-розвантажувачем

дисперсного матеріалу. При необхідності за допомогою допоміжного гідроциліндра 18 створюється додаткове статичне притискання пуансона 1 до порції 2. Вмикається ГПП вібропреса, плунжер 7, вібростіл 5, піддон 9 з порцією концентрату 2, пуансон 1 та траверса 19 з вантажами 20 здійснюють вертикальні зворотно-поступальні переміщення. Завдяки кулькам 4 та шарнірному зв'язку кронштейна 17 з втулкою 14, забезпечується рухомість піддону 9 з концентратом 2 у вертикальному і горизонтальному напрямках. При цьому концентрат піддається віброударному інерційному навантаженню [64], що сприяє видаленню з нього рідинної фази [71]. Остання витікає через фільтрувальну сітку, отвори у піддоні 3 у жолоб навколо вібростола 5 (на схемі не показаний), а далі по трубі стікає у бак (на схемі не показаний), після чого йде на віброударне фільтрування (див. підрозділ 3.1). Для визначення оптимальних параметрів навантаження z_{la} , v та $p_{z,max}$ (див. пункти 2.2.2, 2.2.4), а також тривалості ΣT_z зневоднення порції концентрату, за умови забезпечення його заданої кінцевої вологості U_k та максимальної продуктивності $P_{z,p}$ процесу (див. підрозділ 4.3), потрібно провести попередні експерименти.

Під час зневоднення першої порції, у позиції під бункером 8 йде завантаження другого піддону за описаною вище послідовністю. Після досягнення заданої U_k оброблюваної порції, ГПП вібропреса вмикається, траверса 19 з інерційними вантажами 20 та пуансоном 1 піднімаються вгору. Рамка 3 з піддоном 9 та порцією 2 припіднімаються оператором на 10 - 20 мм, з поворотом втулки 14 на 120° і переміщенням у позицію розвантаження, де за допомогою рукоятки 25 піддон повністю висувається і засувається на місце; зневоднений концентрат при цьому скидається переднім буртом рамки 3 у контейнер-збірник (на схемі не показаний). Одночасно на вібростолі 5 установлюється інший піддон вже завантажений концентратом. Робочий цикл віброударного зневоднення повторюється. Перевагами описаного процесу та вібропреса є мінімальна товщина порції вологого дисперсного матеріалу, що забезпечує досить низьку U_k (див. пункт 2.2.4 та рисунок 2.6). Недоліки: дискретність процесу зневоднення, що негативно відбивається на його продуктивності, а також потреба у ручній праці під час завантаження-розвантаження вібропреса.

Більш ефективною з точки зору забезпечення безперервності робочого процесу є гідроімпульсна валкова машина [168, 227], що також може бути створена на базі ІВПМ, схема якої показана на рисунку 7.2. Машина містить бункер 13 з вологим дисперсним матеріалом, що закріплений на станині 2 над верхньою гілкою стрічки 6 конвеєра, встановленого на рамі 16. Стрічка складається зі сталевих П-подібних пластин 27 шириною 30...50 мм, прикріплених заклепками до гумовотканинної основи 29 (див. розріз А – А на рисунку 7.2). У пластинах

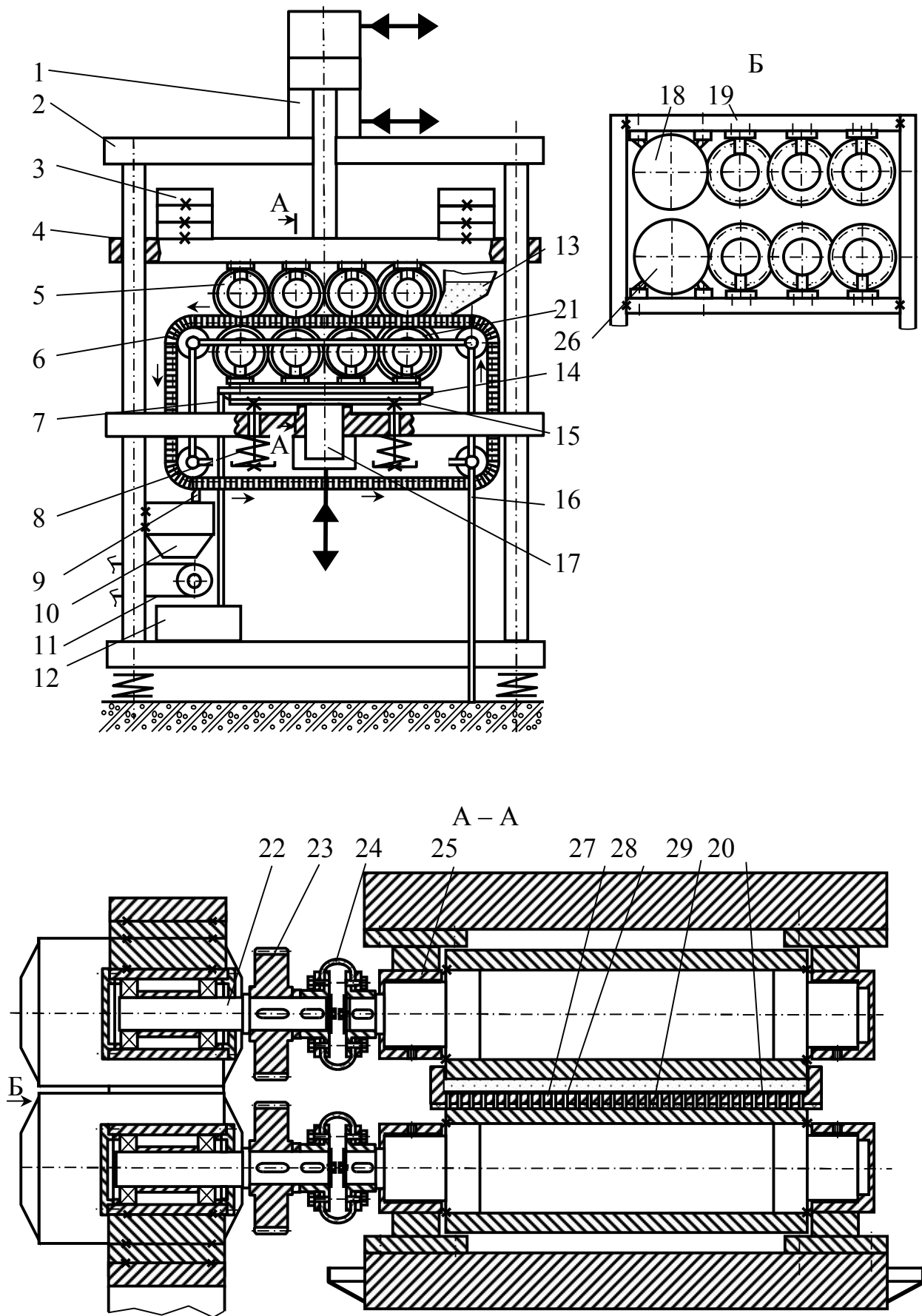


Рисунок 7.2 – Конструктивна схема гідроімпульсної валкової машини для потокового віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів

27 і основі 29 виконане велике число дрібних наскрізних отворів 28, закритих фільтрувальною сіткою 20. Верхня гілка стрічки 6 знаходиться між чотирма верхніми - 5 і чотирма нижніми - 21 взаємно паралельними валками. При цьому верхні валки 5 встановлені у підшипниках ковзання 25 на траверсі 4, а нижні валки – у підшипниках ковзання на вібростолі 15. Кожен з валків зв'язаний пружною муфтою 24 з валом 22, встановленим з можливістю обертання на додатковій рамі 19. На кожному валу 22 закріплене зубчасте колесо 23, що знаходиться у зачепленні з іншими зубчастими колесами відповідного ряду; крайній верхній і крайній нижній вали зв'язані з електродвигунами 18, 26, встановленими на додатковій рамі 19. Навколо вібростолу 15 закріпленій жолоб 14, зв'язаний еластичною трубкою 7 з баком 12 фільтрату. Під нижньою гілкою основного стрічкового конвеєра розташовується, закріпленій на станині 2 уловлювач 10, який являє собою бак без кришки і днища, до верхньої кромки якого у серединному перерізі прикріпленій гумовий ніж 9, що притискається до нижньої поверхні нижньої гілки стрічки 6 по всій її ширині, а під уловлювачем 10 встановлений стрічковий конвеєр 11 для відведення зневодненого матеріалу.

Гідроімпульсна валкова машина працює таким чином. За допомогою допоміжного гідроциліндра 1 траверса 4 з інерційними вантажами 3 та верхніми валками 5 опускається вниз до притискання останніх до верхньої поверхні стрічки 6, а останньої – до нижніх валків 21. Вологий дисперсний матеріал завантажується у бункер 13. Вмикаються ГПП, електродвигуни 18, 26 та привод конвеєра 11. Вологий дисперсний матеріал рівномірним шаром товщиною до 10 мм подається з бункера 13 на поверхню верхньої гілки стрічки 6. Від електродвигунів 18, 26 приводяться в обертання вали 22, а через зубчасті колеса 23 та пружні муфти 24 - і валки 5, 21. При рівномірному обертанні валків стрічка 6 з вологим дисперсним матеріалом переміщується в напрямку показаному стрілками. Плунжер гідроциліндра 17 ГПП, вібростіл 15, нижні 21 та верхні 5 валки і затиснена між ними стрічка 6 з оброблюваним матеріалом, а також траверса 4 з інерційними вантажами 3 здійснюють вертикальні зворотно-поступальні переміщення. В результаті вологий дисперсний матеріал, що проходить між верхніми і нижніми валками піддається статичному та віброударному інерційному навантаженню. Видалена при цьому рідина проходить через фільтрувальну сітку 20 та отвори 28, стікає у жолоб 14 та по трубці 7 потрапляє у бак 12. Зневоднений концентрат скидається зі стрічки 6 через уловлювач 10 на конвеєр 11. Налиплий на стрічці 6 концентрат зрізається ножом 9. Завдяки малій товщині шару матеріалу, що зневоднюється, його чотириразовому стисканню та віброударному навантаженню між валками, а також безперервному руху матеріалу через робочу зону машини, забезпечуються високі $П_{з.р}$, $П_{з.м}$ процесу та мінімальні U_k , $C_з$ (див. підрозділ 4.3).

Але найвищу ефективність за вказаними параметрами матиме гідроімпульсна вальцова установка для остаточного потокового віброударного зневоднення, представлена на рисунку 7.3 [168, 228]. Установка містить круглу обертову матрицю 31 з дрібними наскрізними отворами (на схемі не показані), закритими фільтрувальною сіткою 34, а також установлений над нею бункер 1. До сітки 34 підтиснені верхні обертові конічні вальці 11, 17 з гладкою поверхнею. З бункером 1 зв'язаний завантажувальний лоток 30. Привод матриці 31 включає електродвигун 15 та планетарний редуктор 27. При цьому приводний вал 3 матриці 31, встановлений у підшипниках кочення 29, що розташовані у корпусі 28, закріпленому на станині 16. Також, на станині 16 під матрицею 31, у перерізах розташування вальців 11, 17, встановлені нижні обертові конічні вальці 13, під якими розташований бак 9. Вальці 11, 17 зв'язані через пружні муфти 8, 36 з планетарними редукторами 6, 35, а через них – з електродвигунами 5 і 33, закріпленими на станині 16. Крім цього, вальці 11, 17 через траверси 4, 32 зв'язані з підпружиненими штоками гідроциліндрів 2, 7 ГП. До сітки 34 зверху також підтиснений гумово-металевий ніж 18, закріплений всередині відсмоктувального патрубку 12. Останній за допомогою труби 22 зв'язаний зі збиральною камерою 24, до якої приєднаний вакуумний насос 14. При цьому до кромки нижнього відкритого кінця збиральної камери 24 прикріплене гумове ущільнення 23, яким вона притиснена до горизонтального диску 19 з наскрізним отвором. Діаметр отвору відповідає діаметру нижнього кінця збиральної камери 24, а вісь збігається з її віссю. Горизонтальний диск 19 приводиться в обертання від електродвигуна 25, через черв'ячний редуктор 20. Під диском 19, в перерізі осі камери 24 встановлений контейнер 21.

Установка працює таким чином. Попередньо зневоднений до вологості 70 – 75% концентрат вологого дисперсного матеріалу скочується по лотку 30 у бункер 1, з якого регульованим потоком вивантажується на поверхню сітки 34. Вивантаження відбувається в зоні Б, при цьому концентрат утворює на поверхні сітки рівномірний шар товщиною 5 – 15 мм. Матриця 31 та концентрат на поверхні сітки 34 повільно обертаються. Вальці 11, 17 обертаються зі швидкістю, що відповідає швидкості обертання матриці 31 для запобігання їх взаємному проковзуванню і прискореному зношуванню. Крім цього, вальці 11, 17 здійснюють вертикальні зворотно-поступальні переміщення з частотою до 150 Гц і амплітудою до 4 мм, які можна регулювати для забезпечення оптимального режиму навантаження вологого дисперсного матеріалу. Поступальні переміщення вальцям 11, 17 передаються через траверси 4, 32 від підпружинених штоків гідроциліндрів 2, 7 ГП. Концентрат матеріалу, який потрапляє у зазор між вальцями 11, 17 та сіткою 34 піддається статичному стисканню і віброударному навантаженню. Видалена рідина стікає через сітку 34 і отвори у матриці 31 у бак 9 і далі відводиться на

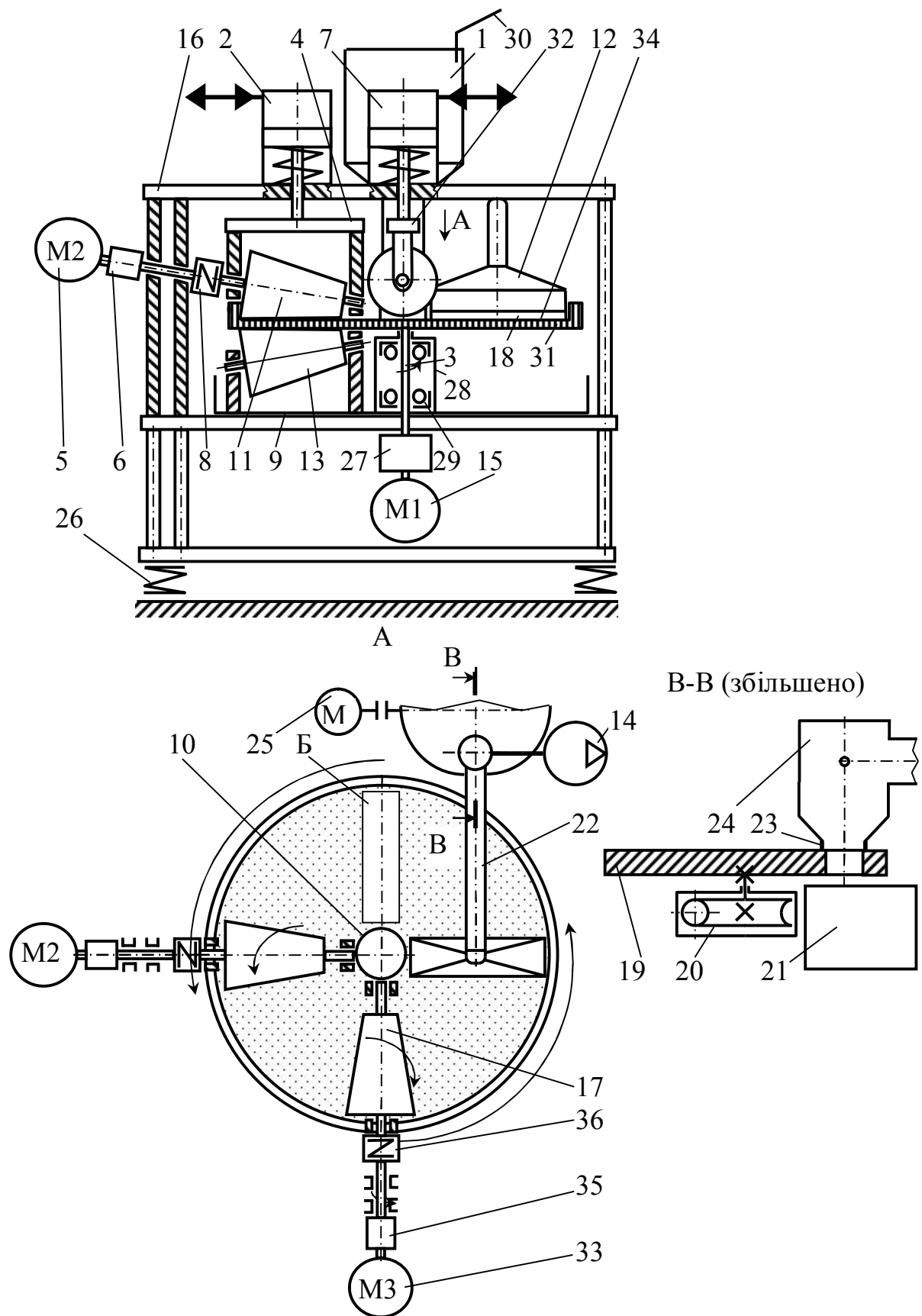


Рисунок 7.3 – Конструктивна схема гідроімпульсної вальцевої установки для остаточного потокового віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів

фільтрування. Тверді частинки концентрату затримуються сіткою 34. Нижні вальці 13 підтримують матрицю 31 знизу, запобігаючи перекосу та заклинюванню підшипників 29. Після проходження під вальцем 17 концентрат з $U_k = 20 - 25\%$ зрізається ножом 18 і під впливом розрідження, створеного насосом 14, засмоктується у приєднані до нього патрубків 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 контейнер 21. Екран 10 служить для запобігання довільному переміщенню концентрату із зони скидання Б одразу в зону його відведення з поверхні сітки 34.

Під час синтезу схем гідроімпульсного обладнання для віброударного зневоднення можуть застосовуватись розробки наведені у [229 - 231].

На замовлення СП «Галка Лтд», в рамках госпдоговірної НДР «Дослідження процесів зневоднення та розробка конструкторської документації установки для зневоднення кавового та ячмінного шламу» (№ держреєстрації 0110U004207), нами на основі схеми на рисунку 7.3 розроблена конструкторська документація установки для віброударного зневоднення кавового та ячмінного шламу, проекція загального виду якої показана на рисунку 7.4. Зокрема були розроблені деталювання, специфікації та складальні креслення установки, з виконанням проектних та перевірних розрахунків. На базі ІВПМ-16 створений гідроімпульсний стенд – прототип установки (див. рисунки 2.1 - 2.3), за допомогою якого проведені експерименти зі зневоднення кавового та ячмінного шламу (див. підрозділ 2.1). Згадана конструкторська документація прийнята до впровадження на СП «Галка Лтд». На проекції установки (див. рисунок 7.4) позначені такі основні елементи: 4 – віброзбуджувач ГПП [64]; 9 – гідроциліндри ГПП, 17 – вальці; 19 – вальці для підтримання матриці; 20 – матриця; 21 – приводний вал; 44 – планетарні мотор-редуктори привода вальців; 45 – планетарний мотор-редуктор привода матриці; 46 – електродвигун ГПП; 48 – пружні муфти з тороподібними оболонками; 49 – клинопасова передача.

При виготовленні даної установки можуть бути використана розроблена раніше і добре відпрацьована конструкторська документація на деякі основні елементи її ГПП: бака для робочої рідини, приводного гідроциліндра, віброзбуджувача, елементів пружного повернення, а також складальні одиниці, агрегати та деталі, що є стандартизованими і вже давно випускаються вітчизняною промисловістю: електродвигуни, планетарні редуктори [264], регулятори витрат, фільтри, запобіжні клапани, гідророзподільники, дроселі [195], кріпильні деталі тощо.

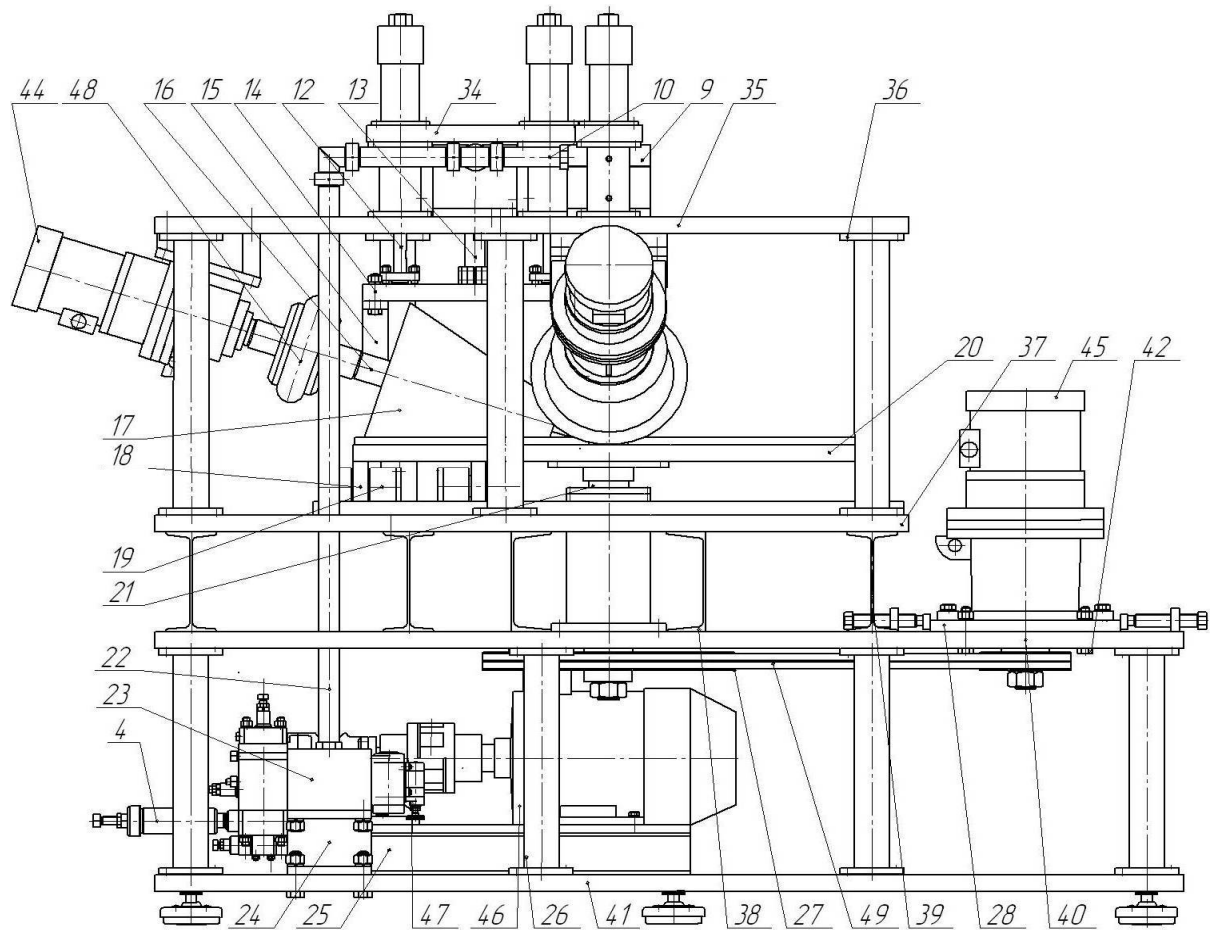


Рисунок 7.4 – Проекція загального виду гідроімпульсної вальцьової установки для віброударного зневоднення кавового та ячмінного шламу

7.3 Рекомендації з практичного впровадження обладнання

Для забезпечення високої ефективності гідроімпульсного обладнання для віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів, необхідно, щоб воно відповідало ряду вимог [5, 11, 178] (див. також підрозділ 3.3): було компактним і одночасно достатньо потужним для здійснення необхідних робочих процесів із заданою продуктивністю; надійним (безвідмовним, довговічним та ремонтпридатним) [13, 181]; простим і технологічним за конструкцією, у виготовленні та в експлуатації [178]; достатньо дешевим (виготовленим з недорогих матеріалів [183], із застосуванням доступних технологій, обладнання та інструменту); таким що споживає мінімум енергії і не вимагає великого числа дорогих запасних частин), порівняно безпечним і нешкідливим для обслуговуючого персоналу та навколишнього середовища (з цією метою гідроімпульсне обладнання необхідно обладнати засобами вібро- і шумоізоляції) [16, 184], мати можливості для безступінчастої і точної зміни в широких межах робочих параметрів режимів зневоднення, а також збереження цих

параметрів по завершенню регулювання [64]. Пропоноване обладнання бажано створювати на базі відомих машин – інерційних вібропрес-молотів (ІВПМ) [64, 65]. Обладнання має функціонувати автоматично, з мінімумом зупинок для технічного обслуговування та ремонту, для чого його необхідно обладнати потрібними датчиками та пристроями і забезпечити комп'ютерне керування та регулювання [182, 184, 185]. Але саме головне це те, що обладнання повинне працювати безперервно і зневоднювати весь добовий об'єм відходів конкретного підприємства до заданої кінцевої вологості.

У випадку необхідності зневоднення великих за обсягом порцій вологих дисперсних відходів, за умови забезпечення високої ефективності робочих процесів (див. підрозділи 4.3, 4.6) доцільно застосовувати багатокомпонентне віброударне навантаження, для реалізації якого установлювати в ГПП обладнання багатходові віброзбуджувачі та генератори імпульсів тиску [72, 73].

Перед впровадженням на виробництві потрібно створити дослідні зразки гідроімпульсного обладнання, за виготовленням та випробовуванням яких обов'язково має стежити конструктор з метою виявлення та подальшого виправлення недоліків [7, 12].

Потрібно врахувати, в якій галузі та за яких умов буде експлуатуватись обладнання. Зокрема, взяти до уваги діапазон зміни фізико-механічних характеристик вологих дисперсних матеріалів [232], що будуть зневоднюватись, параметри приміщення, в якому буде установлене обладнання (діапазон робочих температур, вологості, наявність забруднення повітря, близькість іншого обладнання у приміщенні, амплітуда вібрацій, що створюються при його роботі, тип і вид підлоги, систем опалення, освітлення, вентиляції) [17, 18].

Під час доопрацювання конструкторської та технологічної документації, по завершенні випробовування та обкатки дослідного обладнання, потрібно максимально спростити його конструкцію, підвищити технологічність деталей, раціонально (на підставі розрахунків та обґрунтувань) підібрати форму і розміри елементів, марку матеріалу, з якого вони будуть виготовлятись, точність і шорсткість оброблюваних поверхонь, тип, кількість та параметри зв'язків між елементами, види та режими термообробки, наявність зносостійкого покриття, допуски і посадки з'єднань [164]. Необхідно розробити ефективні системи змащення і охолодження, передбачити можливості для чищення вузлів обладнання, що забруднюються та забиваються частинками вологих дисперсних матеріалів. Продумати заходи обслуговування, діагностування, ремонту обладнання. Визначити зміст, періодичність, обсяги, виконавців, трудомісткість та матеріалоємність операцій з технічного обслуговування та ремонту [17, 18, 233]. Забезпечити раціональну ергономіку обладнання, його мінімальну собівартість та ціну, експлуатаційні витрати. Розрахувати

амортизаційні та інші відрахування, а також терміни окупності обладнання [4, 7, 12].

Випробовування обладнання повинні включати його обкатку на всьому діапазоні робочих режимів (від мінімальних до максимальних значень амплітуди і частоти коливань виконавчих елементів, а також швидкості переміщення матеріалу), при різних співвідношеннях значень їх параметрів [181, 182, 233]. Крім цього, під час випробовувань потрібно піддавати обладнання короткочасним (до 5 хвилин) перевантаженням, шляхом створення в гідросистемі ГПП тиску, що на 25% перевищує номінальний. Необхідно також здійснити спробну обробку порцій вологих дисперсних відходів при зміні в допустимих межах їх основних фізико-механічних характеристик [185]. Під час всіх цих випробовувань обладнання має працювати надійно, стабільно (втримувати установлений режим у продовж достатньо довгого часу). Не повинні створюватись шум і вібрації занадто високої інтенсивності [16], температура робочої рідини в гідросистемі ГПП не повинна перевищувати 50 °С [233]. Остання вимога забезпечується за допомогою теплообмінників, установлених в баках ГПП обладнання [195]. По теплообмінниках має циркулювати холодна вода з максимальною температурою 16 – 18 °С. Слід також переконатись у відсутності витоків робочої рідини через зазори та ущільнення ГПП; у випадку виявлення витоків їх слід обов'язково усунути – підтягнути болти або гайки кріплення, замінити ущільнення [75, 185]. Виконавчі елементи обладнання – валки, матриця (див. рисунки 7.3, 7.4), а також вали електродвигунів та редукторів повинні за відсутності навантаження, при вимкнених приводах, прокручуватись вручну, що забезпечується шляхом регулювання положення їх опорних елементів (установленням та вилученням прокладок) [164].

Завантаження обладнання, його транспортування до місця експлуатації, розвантаження, зберігання повинні здійснюватись без розбирання на складові деталі та вузли, але із забезпеченням захисту від механічних пошкоджень (ударів, поштовхів, струшувань), а також від корозії [13, 18, 233].

У продовж достатньо довгого терміну від початку введення промислових зразків обладнання в експлуатацію конструктору необхідно стежити за його роботою, брати участь в усуненні виявлених недоліків, удосконалювати конструкцію та принцип дії, готувати модернізацію обладнання [7, 11, 15].

Розрахунок економічної ефективності впровадження розробленого автором обладнання для віброударного зневоднення та фільтрування вологих дисперсних матеріалів на СП «Галка ЛТД» поданий в роботах [236, 237].

8. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗНЕВОДНЕННЯ ВОЛОГИХ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ

Як вже вказувалось у підрозділах 3.3 та 7.3, промислове обладнання для віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів суттєво відрізняється від експериментальних установок, досліджених у попередніх розділах монографії. В даному розділі дається кілька схем промислового обладнання для віброударного зневоднення, розроблених з врахуванням наведених у підрозділах 3.3, 7.3 вимог. Крім цього, представлені залежності для розрахунку основних робочих та конструктивних параметрів даного обладнання.

На рисунку 8.1 наведена схема високоефективного технологічного комплексу для зневоднення вологих дисперсних матеріалів [238]. Комплекс містить дві станини. На станині 19 змонтований шнековий прес з насадкою 7, а також пристрій для завантаження прес-форми 21 матеріалом що зневоднюється з приводом від насоса 55. Станина вібропресової гідроімпульсної машини складається з верхньої – 10, середньої – 41 та нижньої – 40 поперечин, з'єднаних двома колонами 11 та чотирма колонами 29. Станина машини встановлена на віброопорах 31. Станина 19 складається з трьох поперечин, десяти колон і також базується на віброопорах. На верхній поперечині станини 19 закріплений зовнішній циліндр 5 з патрубком 4 шнекового преса, в середині якого розташовується внутрішній циліндр 6 з великим числом дрібних наскрізних отворів закритих металевою фільтрувальною сіткою (на схемі не показані). Шнекова насадка 7 приводиться в обертання від електродвигуна 1 через пружну муфту 2 та редуктор 3. Внутрішня порожнина циліндра 5 сполучається трубою 22 з баком 20, встановленому на середній поперечині станини 19. До верхньої поперечини останньої прикріплена одна сторона бака 9 для матеріалу, що зневоднюється. Днище 8 бака 9 є висувним у горизонтальній площині, за рахунок того, що воно має дві напрямні 57 типу «ластівчин хвіст», які вільно входять у відповідні пази бака 9 (див. також розріз А – А на рисунку 8.1). Днище 8 зв'язане зі штоком гідроциліндра 51, встановленого на середній поперечині 52 станини 19. Привод гідроциліндра 51, окрім насоса 55 з фільтром 54 у всмоктувальній гідролінії, включає також двопозиційний чотирилінійний гідророзподільник 53 з електромагнітним керуванням та переливний клапан 56. Ще одна сторона бака 9 пов'язана з верхньою поперечиною 10 вібропресової машини, на якій змонтований допоміжний гідроциліндр 14. Привод гідроциліндра 14 містить насос 17 з фільтром 16 у всмоктувальній гідролінії, двопозиційний чотирилінійний гідророзподільник 15 з електромагнітним керуванням та переливний клапан 18. Зі штоком гідроциліндра 14 зв'язана рухома траверса 12 з інерційними масами 13 та

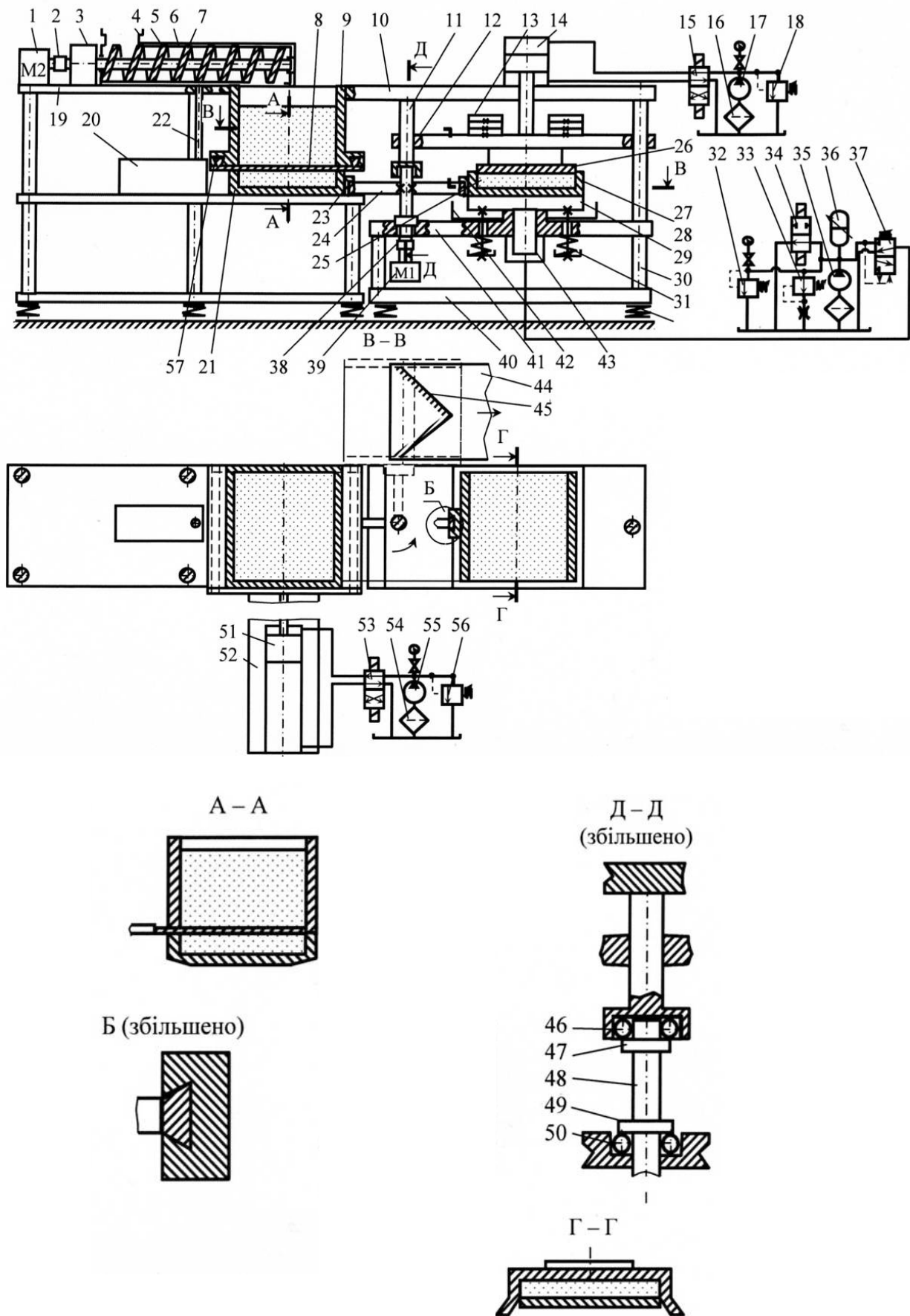


Рисунок 8.1 – Схема технологічного комплексу для зневоднення вологих дисперсних матеріалів

пуансоном 26, що переміщується відносно напрямних колон 11. На середній поперечині 41 змонтований гідроциліндр 43 ГПІ, плунжер якого жорстко пов'язаний з вібростолом 28. Останній підпружинений відносно поперечини 41 пружинами 30. На поперечині 41 навколо вібростолу установлений бак 42. ГПІ машини окрім гідроциліндра 43 включає насос 35 з фільтром у всмоктувальній гідролінії, запобіжний клапан 32, регулятор витрат 33, двопозиційний дволінійний гідророзподільник 34 з електромагнітним керуванням, одноцикловий рідинний гідроаккумулятор 36 та основний елемент керування та регулювання ГПІ – двокаскадний трилінійний віброзбуджувач, приєднаний за схемою «на виході» [64]. У розточці однієї з колон 11 установлений упорний шарикопідшипник 46 (див. розріз Д – Д на рисунку 8.1), у який впирається бурт 47 вала 48. Ще один бурт 49 вала 48 базується на упорний шарикопідшипник 50, установлений у розточці поперечини 41. При цьому вал 48 вільно проходить скрізь отвір у поперечні і з'єднується через пружну муфту 38 з планетарним редуктором і кроковим електродвигуном 39. До вала 48 жорстко прикріплені два кронштейни 24, на кінцях яких виконані вертикальні напрямні типу «ластівчин хвіст» (див. вид Б на рисунку 8.1). Напрямні кронштейнів вільно входять у відповідні пази башмаків 23, прикріплених до прес-форм 21, 27. Зверху напрямні кронштейнів впираються у жорсткі обмежувачі башмаків 23. Прес-форми 21, 27 вільно установлені відповідно на верхній поверхні середньої поперечини станини 19 та на верхній поверхні вібростолу 28. У бокових стінках та днищі обох прес-форм виконане велике число дрібних наскрізних отворів, закритих з середині металевою фільтрувальною сіткою (отвори і сітки на схемі не показані). Поряд з вібропресовою машиною на окремій станині змонтований стрічковий конвеєр 44. Над верхньою гілкою стрічки конвеєра на кронштейні, що жорстко зв'язаний з його станиною, закріплений кутовий ніж 45.

Технологічний комплекс на рисунку 8.1 працює таким чином. Матеріал, що зневоднюється подається безперервним потоком але з певною незмінною продуктивністю через патрубок 4 у внутрішній циліндр 6 шнекового преса. Насадка 7 безперервно і рівномірно обертається, створюючи у середовищі матеріалу в циліндрі 6 певний статичний тиск, необхідний для попереднього зневоднення матеріалу до вологості 75 – 80%. Видалена з матеріалу рідина витискається через дрібні отвори в циліндрі 6, закриті фільтрувальною сіткою, збирається у зовнішньому циліндрі 5, а з нього по трубі 22 стікає у бак 20. Попередньо зневоднений у шнековому пресі матеріал скидається у бак 9. Для зневоднення порції матеріалу на вібропресовій машині від реле часу або комп'ютера (на схемі не показані) у певний момент подається команда на перемикання золотника гідророзподільника 53 у ліву за схемою позицію (насоси комплексу 17, 35 і 55 є постійно увімкненими). Робоча рідина від насоса 55

подається під тиском через гідророзподільник 53 у штокову порожнину гідроциліндра 51, тоді як поршнева порожнина останнього з'єднана зі зливним баком. Поршень гідроциліндра зміщується вправо за схемою до упору, разом з ним повністю висувається днище 8. В результаті прес-форма 21, що знаходиться під днищем завантажується оброблюваним матеріалом. Далі подається команда на перемикання золотника гідророзподільника 53 у праву за схемою позицію. Робоча рідина від насоса 55 під тиском надходить у поршневу порожнину гідроциліндра 51, а штокова порожнина останнього сполучається зі зливом. Поршень гідроциліндра з днищем 8 переміщуються у вихідне положення, таким чином бункер 9 знизу знову закривається. Подається команда на перемикання золотника гідророзподільника 15 у праву за схемою позицію. Робоча рідина від насоса 17 під певним надлишковим тиском починає надходити у штокову порожнину допоміжного гідроциліндра 14; поршнева порожнина останнього з'єднується зі зливом. Поршень гідроциліндра 14 і разом з ним рухома траверса 12 з інерційними масами 13 та пуансоном 26 піднімаються до упору у верхнє положення. Вмикається кроковий електродвигун 39, що забезпечує плавний повільний поворот вала 48 з кронштейнами 24, башмаками 23 та прес-формами 21, 27 на кут 180°. Прес-форма 21 заповнена порцією попередньо зневодненого на шнековому пресі матеріалу устанавлюється на вібростолі 28 під пуансоном 26, тоді як прес-форма 27, яка до повороту вала двигуна 39 розташовувалась на вібростолі, устанавлюється на середній поперечині станини 19 під баком 9 (для полегшення устанавлення прес-форм на вібростолі та на поперечині станини 19 на їх нижніх поверхнях в одному з перерізів виконані лиски (див. розріз А – А на рисунку 8.1). Далі електродвигун 39 вимикається, золотник гідророзподільника 15 перемикається у ліву позицію, робоча рідина від насоса 17 подається у поршневу порожнину гідроциліндра 14 (штокова з'єднана з баком). Поршень гідроциліндра 14, а також траверса 12 з інерційними масами 13 та пуансоном 26 опускаються вниз до устанавлення пуансона на порцію матеріалу 25. Для компенсації похибок точності розташування прес-форми 27 на вібростолі 28 кромки двох бокових стінок пуансона 26 відігнуті у протилежні сторони (див. розріз Г – Г на рисунку 8.1), таким чином при повільному опусканні пуансона положення прес-форми на вібростолі за потребою корегується. Задане зусилля статичного притискання пуансона 26 до порції 25 матеріалу під час його віброударного зневоднення у прес-формі попередньо налаштовують за допомогою переливного клапана 18 [205]. Золотник гідророзподільника 34 перемикається у ліву за схемою позицію в результаті злив у бак робочої рідини, що подається від насоса 35, припиняється і в нагнітальній гідролінії насоса ГП, а також у порожнині гідроакумулятора 36 починається збільшення тиску. У початковий момент часу циклу віброударного зневоднення золотник основного каскаду

віброзбуджувача 37 знаходиться у лівій за схемою позицією. При цьому порожнина гідроциліндра 43 ГП з'єднана зі зливом і тиск в ній мінімальний. Плунжер гідроциліндра 43 знаходиться у вихідному нижньому положенні, а вібростіл 28 притиснений пружинами 30 до запліччя поперечини 41. В момент коли тиск робочої рідини у нагнітальній гідролінії ГП та у порожнині гідроаккумулятора 36 досягає максимального попередньо налаштованого значення p_1 віброзбуджувач 37 відкривається (перемикається у праву за схемою позицію), таким чином, робоча рідина від насоса 35 та від гідроаккумулятора 36 під тиском, що є незначно меншим за p_1 подається у порожнину гідроциліндра 43. Тиск в останній також практично миттєво і досить суттєво збільшується, що призводить до швидкого переміщення вверх плунжера гідроциліндра 43 вібростолу 28, прес-форми 27 з порцією матеріалу 25, пуансона 26, траверси 12 з інерційними масами 13, а також штока і поршня гідроциліндра 14. При цьому стискаються пружини 30. Рухомість прес-форми 27 відносно вертикальної осі забезпечується за рахунок з'єднання прикріпленого до неї башмака 23 і кронштейна 24 через напрямні типу «ластівчин хвіст». Під час переміщення вібростолу 28 вверх порція матеріалу 25 у прес-формі 27 піддається зверху динамічному інерційному та статичному навантаженню. Інерційне навантаження створюється пуансоном 26, траверсою 12 та інерційними масами 13. Статичне навантаження забезпечує гідроциліндр 14 та допоміжний гідропривод з насосом 17. Тим часом клапан першого каскаду віброзбуджувача 37 ГП закривається, що призводить до падіння тиску робочої рідини у нагнітальній гідролінії до мінімальної величини p_2 та обумовлює перемикання золотника основного каскаду у ліву за схемою позицію. Порожнина гідроциліндра 43 знову сполучається зі зливом тиск в ній різко падає, внаслідок чого плунжер гідроциліндра й інші рухомі елементи (вібростіл 28, прес-форма 27 з порцією матеріалу 25, рухома траверса 12 з пуансоном 26 та інерційними масами 13, а також поршень зі штоком гідроциліндра 14) під дією сил власного тяжіння та сили пружності стиснених пружин 30 повертаються у вихідне нижнє положення. Наприкінці холостого ходу вібростолу він вдаряється об запліччя поперечини 41, що обумовлює ударне навантаження порції матеріалу 25 знизу. Одночасно у нагнітальній гідролінії ГП знову починається збільшення тиску робочої рідини від p_2 до p_1 , після чого описаний цикл спрацьовування ГП раз за разом повторюється. В результаті прес-форма 27 здійснює періодичні вертикальні зворотно-поступальні переміщення з частотою ν до 60 Гц і амплітудою z_{1a} до 4 мм. Порція матеріалу 25 у прес-формі 27 піддається віброударному інерційному та статичному навантаженню, що призводить до зневоднення матеріалу. Віджата з нього рідина витікає через фільтрувальну сітку та дрібні отвори у прес-формі 27 і збирається у баку 42, звідки йде на фільтрування [5]. Тим часом за описаною вище послідовністю

здійснюється завантаження прес-форми 21 порцією матеріалу з бака 9, з перемиканнями гідророзподільника 53 та переміщеннями поршня гідроциліндра 51 й днища 8. Після реалізації необхідного числа циклів $n_{ц}$ віброударного навантаження порції матеріалу 25 у прес-формі 27 до забезпечення їх заданої кінцевої вологості $U_k = 20 \div 25\%$ (оптимальна величина $n_{ц}$ визначається експериментально за допомогою гідроімпульсного стенду-прототипу вібропресової машини [5] або розрахунком за формулами [5]), золотник гідророзподільника 34 перемикається у ліву за схемою позицію. Робоча рідина від насоса 35 ГП починає зливатись через гідророзподільник 34 в бак, не виконуючи ніякої роботи. Зворотно-поступальні переміщення вібростолу 28 та віброударне зневоднення порції матеріалу 25 у прес-формі 27 припиняються. Золотник гідророзподільника 15 перемикається у праву за схемою позицію, робоча рідина від насоса 17 починає надходити у штокову порожнину гідроциліндра 14. Поршень останнього і разом з ним траверса 12 з пуансоном 26 та інерційними масами 13 піднімаються вгору. Вмикається електродвигун 39, який забезпечує поворот вала 48 і прес-форм 27, 21 на кут 180° . Під час цього повороту прес-форма 27 проходить під ножом 45, який нижньою кромкою притискається до її днища. В результаті порція зневодненого матеріалу скидається з прес-форми на конвеєр 44. Наприкінці повороту вала електродвигуна 39 порожня прес-форма 27 устанавлюється на середній поперечині станини 19 під баком 9, а завантажена попередньо зневодненим на шнековому пресі матеріалом прес-форма 21 займає положення на вібростолі 28. Далі описаний цикл віброударного зневоднення матеріалу повторюється. Оптимальні параметри навантаження матеріалу під час його віброударного зневоднення (амплітуда z_{1a} і частота ν коливань вібростолу 28, а також максимальний тиск $p_{e,max}$ робочої рідини у порожнині гідроциліндра 43 ГП) налаштовуються при зміні робочих і конструктивних параметрів вібропресової машини: тисків p_1 і p_2 , робочого об'єму W_a гідроаккумулятора 36, попереднього стискання z_{0y} пружин 30, площі прохідного перерізу $S_{p,e}$ регулятора витрат 33, інерційних мас $m_{i,m}$ 13, зусилля статичного притискання P_{cm} пуансона до порції матеріалу 25 [5].

Описане віброударне зневоднення вологих дисперсних матеріалів (кавового шламу, бурякового жому, спиртової барди,) у прес-формі закритого типу при невеликій початковій товщині порції (20 – 30 мм) дозволяє при мінімальних втратах енергії і з достатньо високою продуктивністю (див. вище) забезпечити порівняно низьку кінцеву вологість матеріалу $U_k = 20 \div 24\%$ [5].

Цикл віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів у прес-формі закритого типу можна поділити на чотири етапи [5].

Найінтенсивніше навантаження матеріалу створюється на I-му етапі, коли вібробуджувач 34 (див. рисунок 8.1) є відкритим, тиск p_2 робочої

рідини у порожнині гідроциліндра 43 практично миттєво, за час, що відповідає швидкодії віброзбуджувача із золотниковими запірними елементами $t_{uu} = 10^{-3}$ с [31], збільшується від зливного $-p_{зл}$ до величини, що незначно менша за p_I [64]. Нижній виконавчий елемент вібропресової машини масою m_I (включає маси плунжера гідроциліндра 43, вібростолу 28, прес-форми 27 та порції матеріалу 25), а також верхній виконавчий елемент масою m_{II} (складається з мас пуансона 26, рухомої траверси 12, інерційних мас 13, поршня і штока допоміжного гідроциліндра 14) здійснюють швидке переміщення вверх. При цьому переміщення і початкова швидкість маси m_I на розглядуваному етапі будуть меншими, ніж переміщення і початкова швидкість маси m_{II} , внаслідок стискання порції матеріалу та втрат енергії на його демпфірування. Враховуючи значні прискорення виконавчих елементів вібропресового обладнання з ГПП під час їх робочого ходу - $(8 \div 10) \cdot g$ [64], можна вважати цілком обґрунтованим те, що на даному етапі у середовищі порції матеріалу в напрямках від днища прес-форми вверх і від нижнього перерізу пуансона вниз проходять хвилі стискальних напружень та деформацій. Останні створюються зусиллями $F_{zI}(t)$, $F_{zII}(t)$ відповідно на нижньому та верхньому виконавчих елементах під час їх переміщення відносно вертикальної осі z [5].

На рисунку 8.2 представлені осцилограми зміни тиску $p_a(t)$ робочої рідини у порожнині гідроаккумулятора ГПП вібростенда-прототипу [5] вібропресової машини (див. рисунку 8.1, 6.4, а, б) та зміни тиску $p_c(t)$ у порожнині гідроциліндра його ГПП. Осцилограми одержані з використанням тензOMETричного датчика тиску моделі ADZ-SML-10.0, АЦП моделі Е14-140, персонального комп'ютера та програмного пакету LGraph2 під час зневоднення на вібростенді у прес-формі закритого типу спиртової барди, бурякового жому та кавового шламу.

Згідно із осцилограмою на рисунку 8.2, б, збільшення $p_c(t)$ на I-му етапі циклу спрацьовування ГПП відбувається у продовж проміжку часу, що дорівнює половині тривалості t_6 відкриття віброзбуджувача, яка в свою чергу, відповідає тривалості t_I I-го етапу. Таким чином, значення $F_{zI}(t)$, $F_{zII}(t)$ для першої половини I-го етапу циклу ГПП вібропресової машини (див. рисунку 8.1) можна визначити за рівняннями

$$F_{zI}(t) = (p_c(t) + p_{зл})S_z - m_I(g + \ddot{z}_I) - (\alpha_{\partial z} + \alpha_{mz} + \alpha_{pz})(\ddot{z}_I - \ddot{z}_{II}) - c_y(z_I + z_{0y}) - (c_{mz} + c_{pz})(z_I - z_{II}) - \sigma_{0z} - F_K; \quad (8.1)$$

$$F_{zII}(t) = m_{II}(g + \ddot{z}_{II}) + (\alpha_{\partial z} + \alpha_{mz} + \alpha_{pz})(\ddot{z}_{II} - \ddot{z}_I) + (c_{mz} + c_{pz})(z_{II} - z_I) + \sigma_{0z} + F_K + R_{\partial z} \operatorname{sgn}(\ddot{z}_{II} + \ddot{z}_I) + P_{cm}; \quad 0 \leq t \leq \frac{t_6}{2}, \quad (8.2)$$

де $S_z, S_{d,z}$ – площі поперечного перерізу плунжера гідроциліндра 43 ГП та поршня допоміжного гідроциліндра 14; $\alpha_z, \alpha_{d,z}$ – коефіцієнти в'язкого демпфірування при переміщенні плунжера гідроциліндра ГП та поршня допоміжного гідроциліндра; α_{mz}, α_{pz} – коефіцієнти в'язкості твердої та рідинної фаз матеріалу відносно осі z [5]; c_{mz}, c_{pz} – коефіцієнти жорсткості твердої та рідинної фаз матеріалу відносно осі z [5]; $R_{d,z}$ – сила сухого тертя в ущільненнях поршня і штока допоміжного гідроциліндра (згідно із експериментальними даними [4], з достатньою для проектних розрахунків точністю може бути визначена як: $R_{d,z} = \frac{1}{10}(p_z(t) + p_{3л})S_z$; z_I, z_{II} – переміщення мас m_I та m_{II} ; σ_{0z} – межа текучості твердої фази відносно осі z [5]; F_k – сила, що утримує рідинну фазу матеріалу у капілярах частинок твердої фази [145].

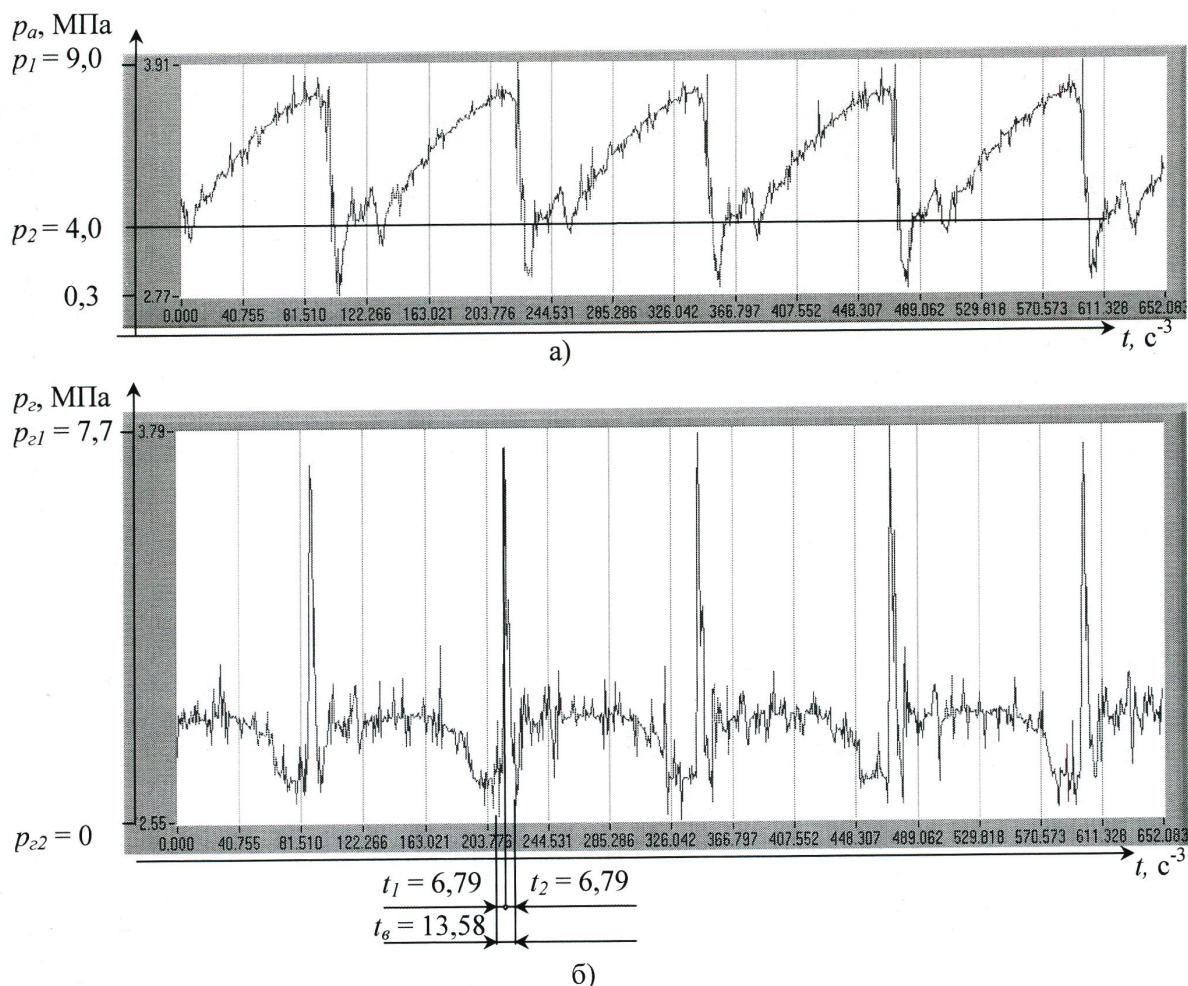


Рисунок 8.2 - Осцилограми зміни: а – тиску p_a робочої рідини в акумуляторній гідролінії; б – тиску p_z робочої рідини у порожнині гідроциліндра ГП вібропресової машини

Тривалість t_e у рівняннях (8.1, 8.2) для вібробуджувача, приєднаного за схемою «на вході» може бути обчислена за формулою [5, 64]

$$t_I = t_g = \frac{1}{\nu} \left[t_{uu} + \frac{(p_1 - p_2)W_{a.o.}}{K_{36.a.o} Q_{H1}} \right], \quad (8.3)$$

в якій $K_{36.a.o}$ – зведений модуль об’ємної пружності об’єму $W_{a.o}$ ГП, що акумулює (включає гідроаккумулятор 36 та нагнітальну гідролінію) [5]; Q_{H1} – подача насоса 35 ГП.

Залежність $p_c(t)$ практично на всьому діапазоні режимів гідроімпульсного вібропресового обладнання з віброзбуджувачем «на вході» [64] має вигляд показаний на рисунку 8.2, б. Тому у першій половині I-му етапі циклу спрацьовування ГП ця залежність може бути досить точно апроксимована лінійною функцією

$$p_c(t) = 0 + \frac{p_{c1}}{t_1} t = \frac{1,17 \cdot p_1}{t_g/2} t = \frac{2,34 \cdot p_1}{t_g} t; 0 \leq t \leq \frac{t_g}{2}. \quad (8.4)$$

У роботі [239] на підставі розрахунків доведений імпульсний характер силового впливу на виконавчі елементи вібропресового обладнання з віброзбуджувачем «на вході». Це дозволяє розглядати їх рух у другій половині I-го етапу та на II-му – IV-му етапах циклу спрацьовування ГП вібропресової машини (див. рисунок 8.1), як вільні коливання лінійної неконсервативної системи (без врахування наявності та змін тиску $p_c(t)$), при цьому похибка у обчисленнях складе до 10% [197].

У зв’язку із вищевикладеним, значення $F_{zI}(t)$ у продовж другої половини I-го етапу циклу ГП визначаємо як

$$F_{zI}(t) = m_I (\ddot{z}_I + g) - (\alpha_z + \alpha_{mz} + \alpha_{pz}) (\ddot{z}_I - \ddot{z}_{II}) - \frac{t_g}{2} < t \leq t_g, \quad (8.5)$$

$$- c_y (z_I + z_{Ik} + z_{0y}) - (c_{mz} + c_{pz}) (z_I - z_{II}) - \sigma_{0z} - F_{\kappa};$$

де z_{Ik} – переміщення маси m_I від початку циклу до моменту часу $t = \frac{t_g}{2}$ (може бути обчислено за допомогою рівняння (8.1)). Зміну $F_{zII}(t)$ для проміжку часу $\frac{t_g}{2} < t \leq t_g$ визначаємо за рівнянням (8.2).

Тиски, створювані на I-му етапі зусиллями $F_{zI}(t)$, $F_{zII}(t)$ у середовищі матеріалу у об’ємах прес-форми відповідно нижче фронту хвилі напружень, що переміщується від днища прес-форми вгору (1-а ділянка) і вище фронту хвилі, яка рухається від пуансона вниз (2-а ділянка), до моменту зустрічі даних хвиль, розраховуємо за рівняннями

$$p_{\partial 1}(t) = F_{zI}(t) S_{n.g}; p_{\partial 2}(t) = F_{zII}(t) S_{n.g}; 0 \leq t \leq t_I, \quad (8.6)$$

де $S_{n.e}$ – площа поперечного перерізу порції матеріалу у прес-формі (відповідає площі поперечного перерізу пуансона).

На цьому ж етапі тиск у середніх шарах порції після зустрічі хвиль напружень, що проходять від днища прес-форми та від пуансона (3-тя ділянка) знаходимо як

$$p_{\partial 3}(t) = S_{n.e} (F_{zI}(t) + F_{zII}(t)) = S_{n.e} F_{z\Sigma}(t); 0 \leq t \leq t_I. \quad (8.7)$$

Зміну густини $\rho_{e,\partial,i}(t)$ матеріалу на I-му етапі на трьох розглянутих ділянках у порівнянні із густиною $\rho_{e,a}$ цього ж самого матеріалу при атмосферному тиску p_a визначаємо за формулою [205]

$$\rho_{e,\partial,i}(t) = \frac{\rho_{e,a}}{\left(1 - \frac{p_{\partial,i}(t)}{K_e}\right)}; i = 1 \div 3; 0 \leq t \leq t_I, \quad (8.8)$$

де K_e – модуль об'ємної пружності матеріалу, що може бути визначений експериментально [5, 205].

У зв'язку із тим, що за результатами вимірювань та експериментів, значення c_{pz} для розглянутих оброблених матеріалів (відходів харчових виробництв) на два порядки перевищують c_{mz} (наприклад, для кавового шламу вологістю $U = 75\%$ вказані параметри складають відповідно $c_{pz} = 163880294$ Н/м і $c_{mz} = 49749,4$ Н/м [5]), а максимальні значення $F_{z\Sigma}(t)$ на різних режимах віброударного навантаження при зневодненні кавового шламу, бурякового жому та спиртової барди змінюються від 60 до 160 кН [5], стискання рідинної фази матеріалу можна не враховувати. До цього ж у рідинній фазі є можливість для витікання через фільтрувальну сітку та отвори у прес-формі 27 (див. рисунок 8.1), тому стискатись вона практично не буде.

Сумарну поточну деформацію твердої фази матеріалу на I-му етапі циклу в обчислюємо як

$$z_{m\Sigma}(t) = z_I - z_{II}; 0 \leq t \leq t_I. \quad (8.9)$$

Умова пластичної деформації твердої фази матеріалу на I-му етапі має вигляд

$$\sigma_{0z} \leq F_{zI}(t) + F_{zII}(t); 0 \leq t \leq t_I. \quad (8.10)$$

Якщо умова (8.10) у певний момент часу I-го етапу циклу виконується, то для визначення пружної деформації твердої фази – $z_{m,np}(t)$ слід від відповідного значення $z_{m\Sigma}(t)$ відняти пластичну деформацію –

$z_{m.nl}(t)$. Якщо ж умова (8.10) не виконується, то у розглядуваний момент часу $z_{m.np}(t) = z_{m\Sigma}(t)$.

У пункті 1.2.1 зазначалось, що рідину у розглядуваних матеріалах (відходах харчових виробництв) можна умовно поділити на вільну, капілярно-зв'язану, адсорбційно-зв'язану та хімічно-зв'язану [124]. При цьому механічним зневодненням можна видалити тільки вільну і капілярно-зв'язану рідину [124].

Умова початку видалення під час віброударного зневоднення капілярно-зв'язаної рідини має вигляд

$$S_{n.6}(F_{zI}(t) + F_{zII}(t)) \geq p_{\sigma}; 0 \leq t \leq t_I, \quad (8.11)$$

де p_{σ} – капілярний тиск рідинної фази матеріалу, що визначається як [145] $p_{\sigma} = \frac{2 \cdot \sigma_{12}}{r}$ (σ_{12} – коефіцієнт поверхневого натягу між газовою та рідинною фазами порції; r – середній радіус капілярів у твердих частинках).

Простіша для перевірки умова початку видалення капілярно-зв'язаної рідини в процесі віброударного зневоднення записується як

$$F_{zI}(t) + F_{zII}(t) \geq F_{\kappa}; 0 \leq t \leq t_I, \quad (8.12)$$

де F_{κ} , згідно із [145] визначається за формулою $F_{\kappa} = \frac{R \cdot T_p}{M_m} \varphi_v$ (R – універсальна газова постійна; T_p , M_m – робоча температура і молекулярна маса матеріалу; φ_v – відносна вологість повітря).

Що стосується витискання вільної рідини матеріалу під час його віброударного зневоднення у прес-формі закритого типу, то механізм даного процесу, а також рівняння, які його описують, наведено у роботі [5].

Як показали результати виконаних нами розрахунків та експериментів [5], від наведених вище умов і параметрів (зусиль та тисків, створюваних у середовищі оброблюваного матеріалу, густини різних ділянок його порції, деформацій твердої фази) значною мірою залежить продуктивність та енергоємність віброударного зневоднення, а отже й ефективність утилізації відходів харчових виробництв з використанням пропонованого способу.

На рисунку 8.3 представлена схема технологічного комплексу в складі шнекового преса та вібропресової машини з ГП для зневоднення [240]. Оброблюваний матеріал подається через патрубок 13 шнекового преса, шнек 10 якого безперервно обертається (привод забезпечує електродвигун 16 через пружну муфту 15 і редуктор 14). Шнек подає

матеріал уздовж внутрішнього циліндра 11, створюючи в їх середовищі деякий статичний тиск $p_{ст.н.}$. Віджата з матеріалу рідка фаза проходить через дрібні наскрізні отвори в стінках циліндра 11, закриті зсередини металевою фільтрувальною сіткою (отвори і сітка на схемі не показані), збирається у зовнішньому циліндрі 12 і далі через отвір в останньому стікає в бак 18, звідки йде на фільтрування [1]. Попередньо зневоднений матеріал подається через патрубок 19 і гумовотканинний рукав 20 у прес-

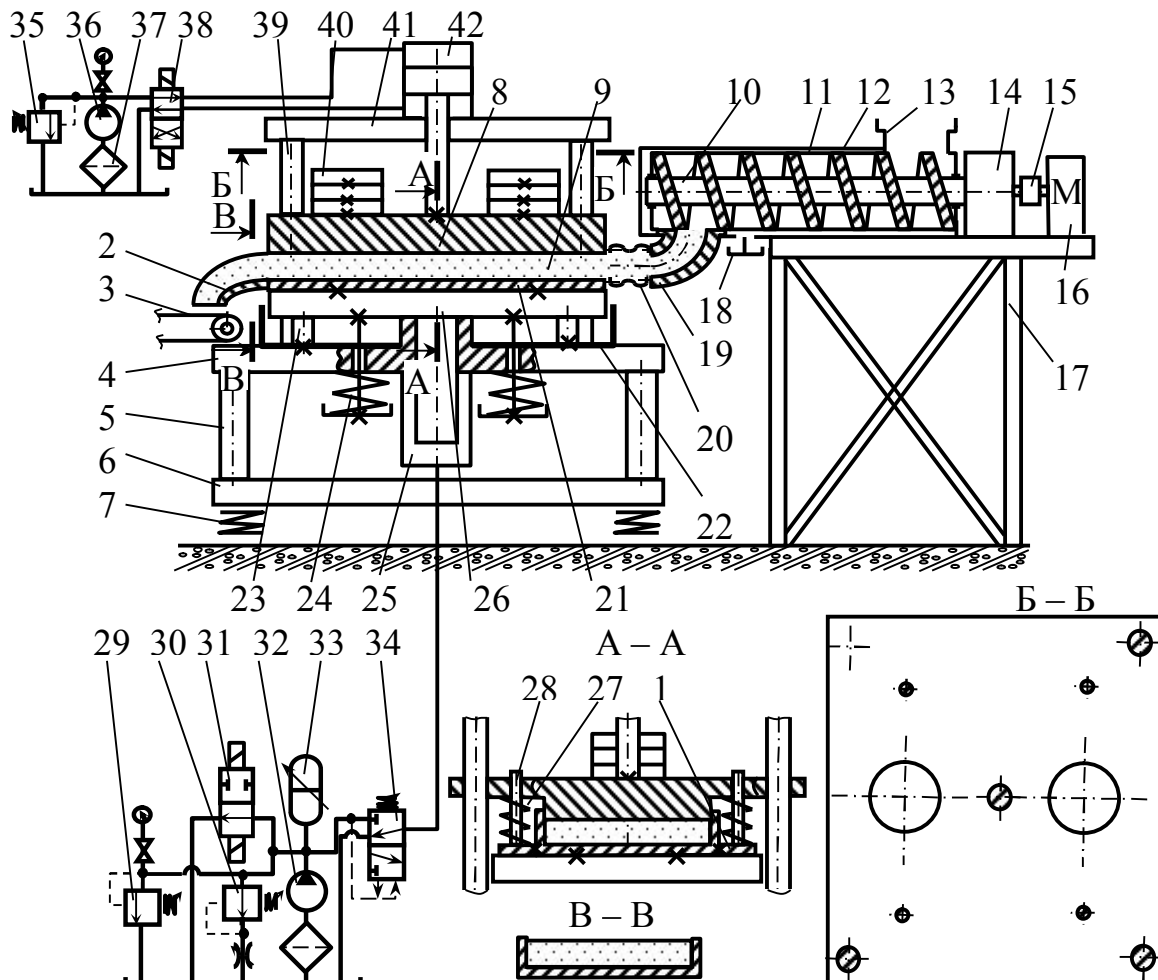


Рисунок 8.3 - Схема комплексу для зневоднення відходів харчових виробництв: 1 – пластини; 2 – жолоб; 3 – стрічковий конвеєр; 4, 6, 41 – середня, нижня та верхня поперечини; 5, 39 – колони; 7 – віброопори; 8 – пуансон; 9 – порція відходів; 10 – шнек; 11, 12 – внутрішній та зовнішній циліндри; 13, 19 – патрубки; 14 – редуктор; 15 – пружна муфта; 16 – електродвигун; 17 – станина; 18, 22 – баки; 20 – гумовотканинний рукав; 21 – прес-форма; 23 – упори; 24, 27 – пружини; 25 – гідроциліндр ГІП; 26 – вібростіл; 28 – штифти; 29 – запобіжний клапан; 30 – регулятор витрат; 31, 38 – гідророзподільники; 32, 36 – насоси; 33 – гідроаккумулятор; 34 – вібробуджувач; 35 – переливний клапан; 37 – фільтр; 40 – інерційні маси; 42 – допоміжний гідроциліндр

форму 21 вібропресової машини з ГПІ для остаточного зневоднення [5]. Циліндр 12 шнекового преса жорстко закріплений на станині 17.

До прес-форми 21 прикріплені чотири пластини 1 (див. розріз А – А на рисунку 8.3), з якими, у свою чергу, жорстко зв'язані штифти 28. У прес-форму 21 зверху вільно входить пуансон 8. Між пуансоном і прес-формою установлені пружини 27, одягнені на штифти 28, що вільно входять в отвори пуансона 8 (див. розріз Б – Б на рисунку 8.3). У прес-формі 21 виконана велика кількість наскрізних отворів діаметром 2 – 3 мм, закритих зсередини металевою фільтрувальною сіткою (на схемі не показані). Ліворуч за схемою до прес-форми 21 прикріплений жолоб 2 (див. розріз В – В на рисунку 8.3). Пуансон 8 навантажений зверху інерційними масами 40, кількість яких можна змінювати. Прес-форма 21 закріплена на вібростолі 26, що, у свою чергу, зв'язаний із плунжером гідроциліндра 25 ГПІ. Станина вібропресової машини складається з верхньої 41, середньої 4 і нижньої 6 поперечин. Верхня і середня поперечини з'єднуються чотирма колонами 39, а середня і нижня поперечини – колонами 5. Станина спирається на чотири віброопори 7. Вібростіл 26 підпружинений відносно середньої поперечини 4 чотирма пружинами 24. Знизу вібростіл 26 притискається до бурта поперечини 4 і до чотирьох упорів 23. На поперечині 4 під вібростолом 26 установлений бак 22. Пуансон 8 переміщається по колонах 39 (див. розріз В – В на рисунку 8.3). На верхній поперечині 41 установлений допоміжний гідроциліндр 42, шток якого зв'язаний з пуансоном 8. ГПІ вібропресової машини складається з насоса 32 з фільтром у всмоктувальній гідролінії, одноциклового рідинного гідроакумулятора 33, запобіжного клапана 29, регулятора витрат 30, двопозиційного дволінійного гідророзподільника 31 з електромагнітним керуванням та двокаскадного трілінійного вібробуджувача 34, підключеного за схемою «на вході» [65]. Привод допоміжного гідроциліндра 42 включає насос 36 з фільтром 37 у всмоктувальній гідролінії, переливний клапан 35 та двопозиційний чотириходовий гідророзподільник 38 з електромагнітним керуванням.

Працює вібропресова машина в такий спосіб. При включеному насосі 32, закритому гідророзподільнику 31 (верхня позиція за схемою) і закритому вібровозбуджувачі 34 (верхня позиція за схемою) робоча рідина від насоса надходить у порожнину гідроакумулятора 33, тиск у якому збільшується. При досягненні максимального значення тиску ($p_1 = 11 - 14$ МПа), величину якого можна точно попередньо налаштувати, вібробуджувач 34 відкривається (нижня позиція за схемою) і робоча рідина від насоса 32 і з порожнини гідроакумулятора 33 під вказаним тиском надходить до робочої порожнини гідроциліндра 25. Плунжер останнього швидко переміщується вгору, долаючи зусилля попереднього стискання пружин 24. Разом із плунжером переміщуються прес-форма 21 з порцією оброблюваного матеріалу 9, пуансон 8 з масами 40, шток і

поршень допоміжного гідроциліндра 42. При падінні тиску робочої рідини на вході у вібробуджувач 34 до мінімальної величини ($p_2 = 4 - 5$ МПа) вібробуджувач закривається (верхня позиція за схемою), з'єднуючи порожнину гідроциліндра 25 зі зливом. Тиск в останньому також зменшується до величини тиску p_6 у зливному баку, в результаті чого плунжер, вібростіл 26, прес-форма 21 з матеріалом 9, що зневоднюється, пуансон 8 з масами 40, а також шток і поршень гідроциліндра 42 під дією власної сили ваги і сили пружності стиснених пружин 24 повертаються у вихідне нижнє положення з ударом вібростолу 26 наприкінці холостого ходу об бурт поперечини 4 та об упори 23. Даний ударний імпульс передається матеріалу 9 і пуансону 8, що стискає пружини 27 і забезпечує додаткове навантаження матеріалу зверху. Тим часом у нагнітальній гідролінії насоса 32 знову починається етап збільшення тиску з повторенням описаного циклу спрацьовування ГП. Таким чином, при періодичному збільшенні і зменшенні тиску робочої рідини в порожнині гідроциліндра 25, вібростіл 26 і зв'язані з ним рухомі елементи, у тому числі порція оброблюваного матеріалу 9, здійснюють вертикальні зворотно-поступальні переміщення з частотою ν до 60 Гц і амплітудою z_a до 4 мм (дані параметри можна безступінчасто регулювати за допомогою вібробуджувача 34 і регулятора витрат 30). В результаті матеріал 9 у прес-формі 21 піддається віброударному навантаженню, що сприяє видаленню з нього рідкої фази. Остання витікає через фільтрувальну сітку й отвори в прес-формі 21 і збирається в баку 22, з якого йде на фільтрування. Зневоднений концентрат витискається з прес-форми на жолоб 2 і далі скидається на стрічковий конвеєр 3, по якому подається на сушіння. Привод допоміжного гідроциліндра 42 слугує для піднімання й опускання пуансона 8 з масами 40 з метою періодичного (раз у зміну) очищення прес-форми 21 від залишків матеріалу 9, а також при необхідності для забезпечення статичного притискання пуансона 8 до порції матеріалу 9 у прес-формі 21 у процесі його зневоднення. Для підйому пуансона 8 необхідно від'єднати від нього рукав 20, запустити насос 36 і переключити золотник гідророзподільника 38 у нижню за схемою позицію. Тоді робоча рідина від насоса 36 буде подаватись під тиском у штокову порожнину гідроциліндра 42, а поршнева порожнина останнього буде з'єднана зі зливом. Тиск робочої рідини в штоковій порожнині буде зростати, а в поршневій зменшуватись. В результаті поршень та шток гідроциліндра 42 і разом з ними пуансон 8 з вантажами 40 піднімуться вгору. Для опускання пуансона гідророзподільник 38 перемикається у верхню за схемою позицію. Робоча рідина від насоса 36 при цьому подається в поршневу порожнину гідроциліндра 42, тоді як його штокова порожнина сполучається зі зливом. Для створення додаткового статичного притискання пуансона 8 до порції матеріалу 9 переливний клапан 35 налаштовують на певний тиск p_{np} , що відповідає заданому зусиллю

притискання і при увімкненому насосі 36 перемикають гідророзподільник 38 у верхню за схемою позицію.

Одним з основних робочих параметрів процесів віброударного зневоднення матеріалу, від якого залежить продуктивність процесу, є тиск p_v у середовищі порції 9 матеріалу у прес-формі 21. Але величина p_v буде змінюватись у продовж кожного циклу віброударного навантаження порції 9 та по об'єму останньої. У поперечному перерізі прес-форми 21 (див. розріз А – А на рисунку 8.3) максимальні значення p_v будуть у шарах порції, що безпосередньо прилягають до днища прес-форми (тиск $p_{vl.max}$) та до пуансона 8 (тиск $p_{vll.max}$) в момент часу початку переміщення вібростолу 26 ввєрх. При цьому з достатньо високою для проектних розрахунків точністю значення $p_{vl.max}$, $p_{vll.max}$ можна розрахувати за формулами

$$p_{vl.max} = \frac{p_{z.max} S_{nl} - c_n z_{0n}}{S_n}; p_{vll.max} = \frac{m_{II}(g + a_{II}) + p_{np} S_{u.d} + R_{к,y}}{S_n}, \quad (8.13)$$

де $p_{z.max}$ – максимальний тиск у порожнині гідроциліндра 25 ГП, який приблизно дорівнює p_I ; S_{nl} , S_n , $S_{u.d}$ – площі поперечного перерізу плунжера гідроциліндра 25, прес-форми 21 (пуансона 8) та ефективної площі поршня з боку штокової порожнини гідроциліндра 42; c_n , z_{0n} – коефіцієнт жорсткості та попереднє стискання пружин 24; m_{II} – маса верхнього виконавчого елемента вібропресової машини, що включає маси пуансона 8, інерційних мас 40, поршня і штока допоміжного гідроциліндра 42; g – прискорення сили тяжіння; a_{II} – прискорення маси m_{II} (під час проведення проектних розрахунків значення прискорень виконавчих елементів вібропресових машин з ГП можна наближено приймати рівними $(8 \div 10) g$ [65]; $R_{к,y}$ – сумарна сила сухого тертя між колонами 39 та пуансоном 8, між штифтами 28 та пуансоном 8, а також в ущільненнях поршня і штока допоміжного гідроциліндра 42 (згідно із розрахунками [65], проведеними для вібропресових машин різного призначення, величину $R_{к,y}$ з високим ступенем наближення можна прийняти рівною $1/10$ значення рушійного зусилля $F_p = p_{z.max} S_{nl}$).

На рисунку 8.4, а представлена аналітична залежність зміни тиску $p_{v.max}$ у поперечному перерізі порції оброблюваного матеріалу у прес-формі по висоті останньої, на початку циклу віброударного навантаження. Як показали розрахунки [5] величина $p_{vl.max}$ є дещо більшою за $p_{vll.max}$. Крім цього, очевидно що у середніх шарах порції тиск $p_{v.max}$ є меншим за $p_{vl.max}$, $p_{vll.max}$, у зв'язку із втратами енергії на пружне і в'язке демпфірування у середовищі порції. Однак при незначній висоті порції H_n зменшенням $p_{v.max}$ у середніх перерізах можна знехтувати.

На рисунку 8.4, б представлена аналітична залежність зміни $p_{v.max}$ по довжині L_n порції у шарі матеріалу, що безпосередньо прилягає до днища

прес-форми на початку циклу віброударного навантаження. І ця залежність є також нелінійною. Максимальним значення $p_{в.мах}$ буде в точці на вертикальній осі порції: $p_{в.мах} = p_{в.л.мах}$. На вході у прес-форму у перерізі з'єднання останньої з гумовотканинним рукавом 20 (див. рисунок 8.3) тиск $p_{в.мах}$ буде приблизно відповідати тиску на виході шнекового преса: $p_{в.мах.вх} = p_{ш.п.}$. На виході з прес-форми у перерізі приєднання жолоба 2 тиск $p_{в.мах}$ дорівнюватиме атмосферному тиску: $p_{в.мах.в} = p_0$.

Ще одним важливим робочим параметром процесів віброударного зневоднення, від якого також значною мірою залежить їх ефективність є частота ν коливань вібростолу 26 (див. рисунок 8.3) [5]. Як відомо, частота ν є зворотно-пропорційною періоду коливань T , який для розглядуваної гідросистеми відповідає тривалості $T_{ц}$ циклу спрацьовування ГП. Отже

$$\nu = \frac{1}{T_{ц}}. \quad (8.14)$$

Тривалість $T_{ц}$, в свою чергу, складається з часу $t_{н.м}$ набору тиску у об'ємі $W_{о.а}$ ГП, що акумулює від p_2 до p_1 та часу $t_{з.м}$ зменшення тиску від p_1 до p_2 . Об'єм $W_{о.а}$ включає внутрішній об'єм W_a гідроакумулятора 33 та об'єми гідроліній довжинами $l_{н1}, l_{н2}$, з площами прохідних перерізів $f_{н1}, f_{н2}$, які з'єднують насос 32 з гідроакумулятором 33 та вібробуджувачем 34. Тобто

$$T_{ц} = t_{н.м} + t_{з.м}. \quad (8.15)$$

Час $t_{н.м}$ наближено визначаємо за допомогою формул [3]

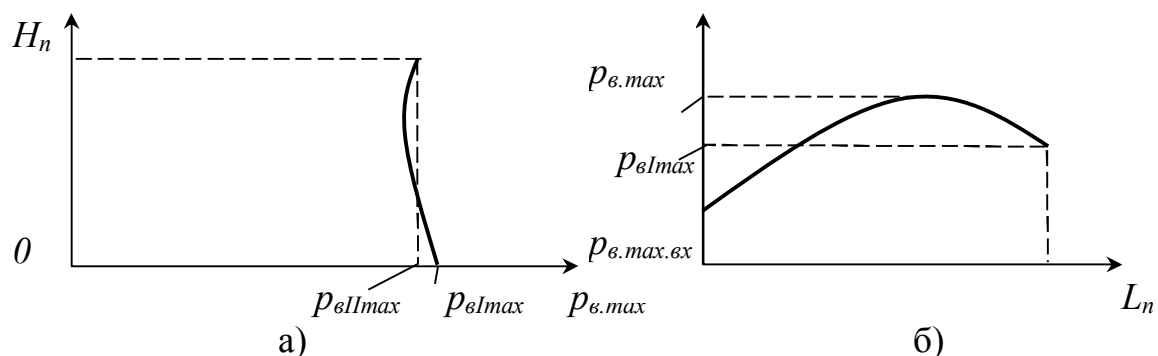


Рисунок 8.4 - Залежності максимального тиску $p_{в.мах}$ у середовищі матеріалу на початку циклу віброударного навантаження по висоті H_n порції (а) та по довжині порції L_n (б): $p_{в.л.мах}$, $p_{в.л.мах}$ – тиски у шарах порції, що прилягають до днища прес-форми та до пуансона; $p_{в.мах.вх}$, $p_{в.мах.в}$ – тиски на вході та на виході з прес-форми

$$\frac{\Delta W_{о.а}}{W_{о.а}} = \frac{\Delta p}{K_{о.а}}; \Delta W_{о.а} = \frac{Q_n - Q_{п.в}}{t_{н.м}}, \quad (8.16)$$

де $\Delta W_{o.a}$ – збільшення об'єму робочої рідини в об'ємі $W_{o.a}$, що забезпечується за рахунок подачі Q_n насоса 32 та призводить до збільшення тиску $\Delta p = p_1 - p_2$; $Q_{p.в}$ – витрати робочої рідини, що зливається через площу прохідного перерізу $f_{p.в}$ регулятора витрат 30; $K_{o.a}$ – зведений модуль об'ємної пружності об'єму $W_{o.a}$ [205], що можна визначити за формулами [5, 205]

$$K_{o.a} = 1 / \left(\frac{1}{K_{p.a.cp}} + \frac{1}{K_{n1}} + \frac{1}{K_{n2}} + \frac{1}{K_a} \right); K_{p.a.cp} = \frac{K_{p.a1} + K_{p.a2}}{2}; \quad (8.17)$$

$$K_{p.a1} = \frac{1,5 \cdot K_p \left(\frac{W_p}{W_2} + 1 \right)}{\frac{W_p}{W_2} + 1,5 \cdot K_p \frac{p_0}{p_1^2}}; K_{p.a2} = \frac{1,5 \cdot K_p \left(\frac{W_p}{W_2} + 1 \right)}{\frac{W_p}{W_2} + 1,5 \cdot K_p \frac{p_0}{p_2^2}};$$

$$K_{n1} = \frac{K_m \cdot \delta_{n1}}{d_{n1}}; K_{n2} = \frac{K_m \cdot \delta_{n2}}{d_{n2}}; K_a = \frac{K_m \cdot \delta_a}{d_a},$$

де $K_{p.a.cp}$ – середня величина адиабатного модуля об'ємної пружності робочої рідини в об'ємі $W_{o.a}$ при зміні тиску від p_1 до p_2 ; $K_{p.a1}$, $K_{p.a2}$ – адиабатні модулі пружності при тисках p_1 і p_2 з урахуванням вмісту нерозчиненого повітря; W_p , W_2 – відповідно, об'єми рідинної і газової фаз робочої рідини при атмосферному тиску p_0 ; K_{n1} , K_{n2} , K_a – зведені модулі об'ємної пружності стінок гідроліній і порожнини об'єму $W_{o.a}$; K_m – модуль об'ємної пружності матеріалу гідролінії або порожнини; δ_{n1} , δ_{n2} , δ_a , d_{n1} , d_{n2} , d_a – товщини стінок та діаметри гідроліній і порожнини об'єму $W_{o.a}$.

Інші параметри у формулах (8.16) визначаємо таким чином [205]

$$W_{o.a} = l_{n1} f_{n1} + l_{n2} f_{n2} + W_a; Q_{p.в} = \mu_{p.в} f_{p.в} \sqrt{2 \left(\frac{p_1 + p_2}{2} - p_0 \right)} / \rho_p, \quad (8.18)$$

де $\mu_{p.в}$ – коефіцієнт витрат регулятора витрат [205]; ρ_p – густина робочої рідини.

З формул (8.16) отримуємо

$$t_{н.м} = \frac{(Q_n - Q_{p.в}) K_{o.a}}{W_{o.a} (p_1 - p_2)}. \quad (8.19)$$

Після підстановки у (8.19) формул (8.17, 8.18) можна розрахувати $t_{н.м}$.

За результатами експериментів [5] значення $t_{3.m}$ для вібропресових машин з ГП з віброзбуджувачем «на вході» [65], незалежно від їх призначення складає

$$t_{3.m} \approx 0,1 \cdot T_u = t_{н.м} / 9. \quad (8.20)$$

Для визначення амплітуди z_a коливань вібростолу складаємо рівняння руху виконавчих елементів вібропресової машини на етапі їх переміщення з граничного нижнього у граничне верхнє положення

$$(m_I + m_{II}) \ddot{z} = 0,9 \cdot p_I S_{нл} - c_n (z_{0н} + z) - p_{np} S_{ш.д}; \quad 0 \leq t \leq t_{н.м}, \quad (8.21)$$

де m_I – маса нижнього виконавчого елемента машини, що включає маси плунжера гідроциліндра 25, вібростолу 26, прес-форми 21 та порції матеріалу 9.

Розв’язуючи рівняння (8.21) чисельними методами на комп’ютері при $t = t_{н.м}$ визначаємо $z(t_{н.м}) = z_a$.

У роботі [231] розроблені схеми обладнання з ГП для багатокомпонентного віброударного пресування заготовок з непластичних порошків. При цьому теоретично та експериментально обґрунтовано, що застосування даного обладнання забезпечує у порівнянні із однокомпонентним віброударним пресуванням підвищення результуючих густини, рівногустини та міцності особливо великогабаритних заготовок, за рахунок створення умов для додаткової рухомості частинок матеріалу у декількох площинах, їх кращого та більш рівномірного перерозподілення по об’єму прес-форми [239].

З врахуванням вищевикладеного, у випадку використання багатокомпонентного віброударного навантаження для зневоднення оброблюваних матеріалів слід також очікувати підвищення ефективності. Однак відомі схеми обладнання для створення такого навантаження [231, 239] є не цілком придатними для впровадження їх у харчовій промисловості, оскільки в них не врахована специфіка оброблюваних матеріалів, особливості реалізації технології зневоднення та не забезпечена можливість безперервної (поточної) реалізації робочого процесу у автоматичному режимі.

Під час розробки схеми установки для двокомпонентного віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів брався до уваги весь досвід створення та використання як вібропресів для віброударного навантаження непластичних порошкових матеріалів [239], так й обладнання харчової промисловості [5]. При цьому враховувались такі основні вимоги:

– забезпечення достатньо високих показників економічної ефективності зневоднення: кінцевої вологості матеріалу не нижчої $U_k =$

=20–25 %, продуктивності за зневодненим вологим матеріалом 600–800 т за добу, середньої енергоємності не вищої 2,5 кВт·год/т;

- реалізація двокомпонентного віброударного зневоднення у безперервному потоковому або періодичному автоматизованому режимі;

- здійснення не менше ніж трьох послідовних стадій зневоднення з поступовим підвищенням від стадії до стадії й упродовж окремих стадій інтенсивності навантаження для оптимізації витрат енергії та часу;

- реалізація принаймні останньої стадії зневоднення у прес-формі закритого типу, що забезпечить необхідну інтенсивність навантаження та вказані вище значення U_k ;

- здійснення всіх стадій зневоднення на одній установці з мінімізацією витрат допоміжного часу;

- спрощення конструкції установки, зменшення її матеріалоємності, підвищення надійності, мінімізація витрат часу й коштів на обслуговування та ремонт;

- забезпечення автоматизованого безступінчастого й точного регулювання в широких межах робочих параметрів установки для реалізації оптимального режиму навантаження залежно від заданих початкових та кінцевих фізико-механічних характеристик матеріалів, що зневоднюються та від інших параметрів ефективності зневоднення;

- мінімізація або усунення негативних впливів з боку установки на людину й навколишнє середовище.

На рисунку 8.5 наведена розроблена з врахуванням вищевказаних вимог схема установки з ГПІ для двокомпонентного віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів [241]. Працює установка таким чином. Оброблюваний матеріал з початковою вологістю $U_n = 95 - 97$ % періодично подається у баки 1, де накопичуються. Вмикається допоміжний гідропривод гідроциліндрів 8, робоча рідина подається в їх штокові порожнини (поршневі порожнини сполучені зі зливом). Поршні гідроциліндрів 8 і разом з ними заслінки 29 (розріз Б-Б на рисунку 8.5) розходяться в протилежні сторони до упора. В результаті матеріал з баків 1 по гумовотканинних трубах 3 та через отвори в пуансоні 7 стікає у прес-форму 15 і заповнюють її доверху. Допоміжний гідропривод та гідроциліндри 8 забезпечують зміщення заслінок 29 у вихідні положення, таким чином, останні перекривають отвори у пуансоні 7. Після цього робоча рідина від допоміжного гідропривода подається у штокові порожнини гідроциліндрів 12, в результаті пластини 14 входять у пази пуансона 7 (розріз Б-Б на рисунку 8.5) й обмежують його переміщення відносно прес-форми 15. Запускається ГПІ установки з восьмиходовим вібробуджувачем [239] (на схемі не показаний), що забезпечує періодичну зміну тиску робочої рідини в межах від $p_2 = 4$ МПа до $p_1 = 11$ МПа у поршневій порожнині гідроциліндра 2 згідно із «трикутним» законом, а в порожнинах гідроциліндрів 19 – за «імпульсним» законом [239]. Внаслідок

цього, поршень гідроциліндра 2 і разом з ним траверса 6 з інерційними масами 4 та пуансоном 7, прес-форма 15 з порцією матеріалу 17, що зневоднюється та заслінкою 22, вібростіл 26 з напрямним кільцем 11 (розріз Д-Д на рисунку 8.5) здійснюють вертикальні зворотно-поступальні переміщення з частотою ν до 60 Гц і амплітудою A до 3 мм (дані параметри навантаження можна змінювати). На етапі збільшенні тиску в гідроциліндрі 2 і ходу вниз вказаних рухомих елементів стискаються пружини 18, наприкінці ходу вібростіл 26 вдаряється об станину 10 (даний ударний імпульс передається прес-формі 15 і порції матеріалу 17). На етапі зменшення тиску в гідроциліндрі 2 під впливом стиснених пружин 18 реалізується зворотний хід рухомих елементів вгору (попереднє стискання пружин, а отже й зусилля повернення можна регулювати за допомогою гвинтів 9).

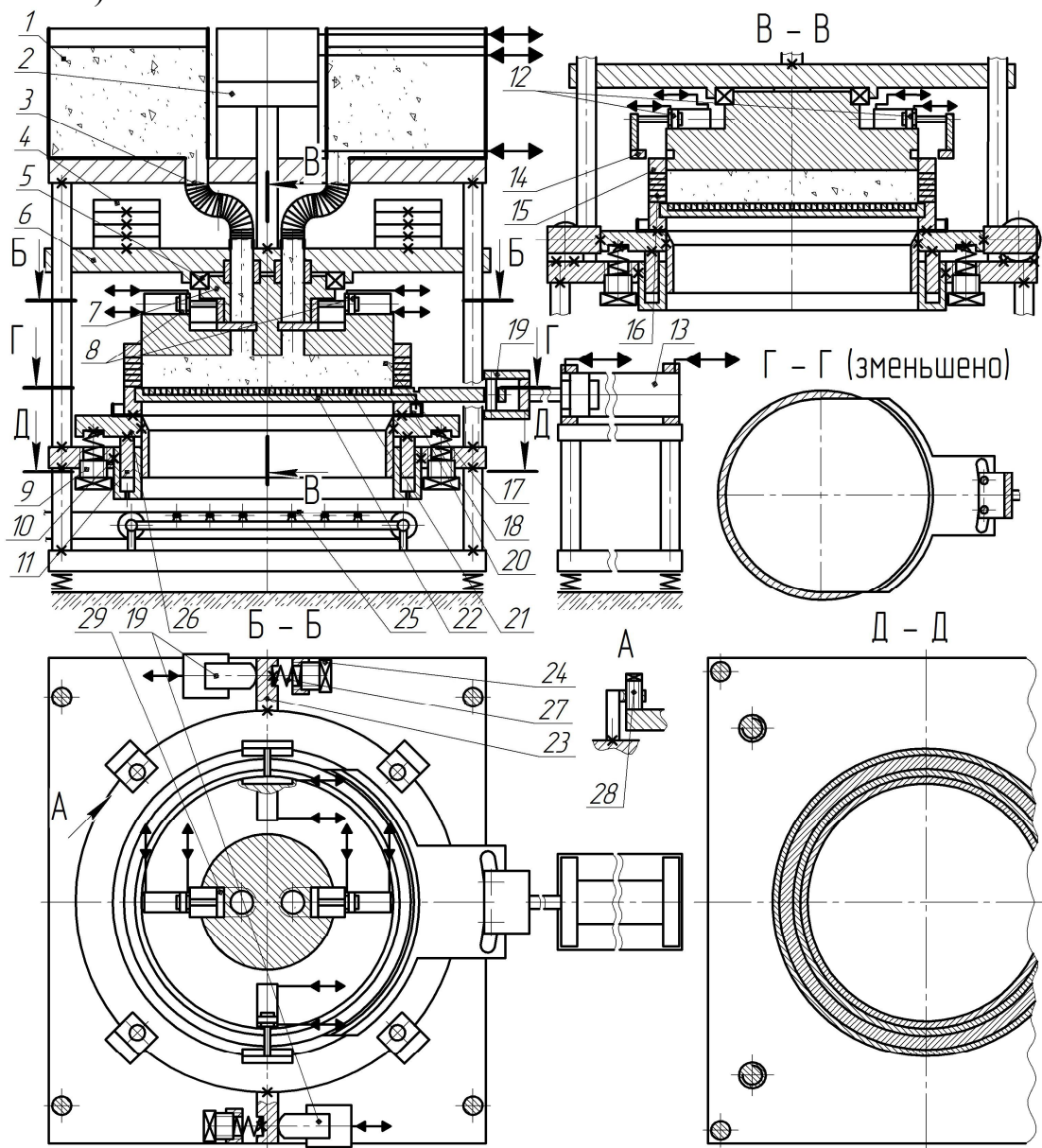


Рисунок 8.5 - Схема установки з ГП для тристадійного двокомпонентного віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів

Наприкінці ходу вверх вібростіл 26 вдаряється об торці чотирьох обмежувальних гвинтів 28 (вид А на рисунку 8.5), за допомогою яких можна також задати величину ходу рухомих елементів. Одночасно, ще на етапі руху вібростолу 26 вниз збільшується тиск в гідроциліндрах 19, їх плунжери висуваються в протилежні сторони (розріз Б-Б на рисунку 8.5) і через важелі 23 забезпечують поворот вібростолу і зв'язаних з ним рухомих елементів навколо вертикальної осі. При цьому стискаються пружини 27 (їх попереднє стискання задається гвинтами 24). На етапі зменшення тиску в гідроциліндрах 19 стиснені пружини 27 повертають рухомі елементи навколо вертикальної осі у вихідні положення. Таким чином, при повторюванні описаних етапів циклів зміни тиску у ГПП рухомі елементи здійснюють періодичні зворотно-гвинтові рухи. При цьому поворот пуансона 7 навколо вертикальної осі забезпечується за рахунок установлення його в упорному підшипнику кочення 5, а рухомість заслінки 22 відносно кронштейна 19 реалізується завдяки їх штифтовому з'єднанню (розріз Г-Г на рисунку 8.5).

Результатом даних зворотно-гвинтових переміщень є періодично змінюване за величиною і напрямком двокомпонентне віброударне інерційне навантаження порції матеріалу 17 у прес-формі 15, його струшування, перемішування й витискання рідини з проміжків між твердими частинками. При цьому вертикальна складова навантаження сприяє перетіканню рідини вниз у бік заслінки 22, а відцентрові сили витискають її з серединних шарів до стінок прес-форми 15. У заслінці 22 та в стінках прес-форми виконане велике число дрібних отворів 23, 16, закритих зсередини металевою фільтрувальною сіткою, що затримує тверді частинки оброблюваного матеріалу. Рідина ж проходить через осередки сітки, отвори 23, 16 та зливається у бак 20, звідки йде в каналізацію. На даній першій стадії попереднього зневоднення порції 17 навантаження на неї з боку пуансона 7 відсутнє, оскільки останній зафіксований пластинами 14 відносно прес-форми. Авторами з використанням стенду з ГПП були проведені експерименти з однокомпонентного віброударного зневоднення спиртової барди, бурякового жому та кавового шламу з $U_n = 95\%$. Після реалізації стадії їх попереднього зневоднення без навантаження пуансоном тривалістю 13–15 с вологість оброблюваних матеріалів не перевищувала $U_{к1} = 85–87\%$ [242].

На другій стадії зневоднення ГПП вимикається. З використанням допоміжного гідропривода й гідроциліндрів 12 пластина 14 відводиться від пуансона 7. Запускається ще один допоміжний гідропривод, що подає робочу рідину у поршневу порожнину гідроциліндра 2 (штокова порожнина останнього сполучена зі зливом). Пуансон 7 повільно опускається, здійснюється статичне пресування порції 17 у прес-формі 15. Тривалість другої стадії під час зневоднення матеріалів на стенді з ГПП [242] складала 10 с, після чого вологість їх знижувалась до $U_{к2} = 76–78\%$.

На третій стадії зневоднення вимикається допоміжний гідропривод і знову вмикається ГПІ (але пуансон 7 залишається незафіксованим відносно прес-форми 15). Рухомі елементи здійснюють зворотно-гвинтові переміщення навколо вертикальної осі, реалізується найбільш інтенсивний режим двокомпонентного віброударного навантаження матеріалу 17 у прес-формі 15 з періодичним стиканням його пуансоном 7. За результатами експериментів [242], після завершення третьої стадії однокомпонентного віброударного зневоднення матеріалу тривалістю 28–30 с, з використанням статичного притискання пуансона до порції матеріалу кінцева вологість останнього складала $U_{кз} = 22–25 \%$. Очевидно, що після двокомпонентного віброударного зневоднення на установці, показаній на рисунку 8.5 вона буде ще нижчою, а продуктивність робочого процесу – вищою, оскільки завдяки додатковій динамічній складовій навантаження, забезпечується більша рухомість рідини в середніх шарах порції й покращення умов для її витікання назовні. Зокрема, авторами були проведені попередні експерименти зі зневоднення на вібропресі з ГПІ моделі ІМЗГК-5 [239] зі зворотно-гвинтовим рухом вібростолу порцій вологого дисперсного матеріалу трьох вказаних вище видів. Після їх попереднього двокомпонентного віброударного зневоднення без використання пуансона (оптимальна тривалість стадії складала 11–13 с) вологість матеріалів не перевищувала $U_{к1} = 83 – 85 \%$, при цьому об'єм порцій, що зневоднювалися, у порівнянні із однокомпонентним віброударним зневодненням, збільшився у 2,3 рази – з $1,13 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ до $3,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, що забезпечує відповідне нарощування продуктивності робочого процесу.

Після остаточного зневоднення порції вологого дисперсного матеріалу на пропонованій установці (рисунок 8.5) ГПІ вимикається. Запускається допоміжний гідропривод гідроциліндра 13. Робоча рідина подається у його штокову порожнину, поршнева зв'язана зі зливом. Поршень гідроциліндра 13 зміщується вправо за схемою, разом з ним висувається заслінка 22, таким чином, повністю відкривається нижній переріз прес-форми 15. Вмикається допоміжний гідропривод гідроциліндра 2, в результаті його поршень і разом з ним траверса 6 з пуансоном 7 опускаються вниз, виштовхуючи зневоднену порцію 17 з прес-форми 15 на верхню гілку стрічкового конвеєра 25. Останній транспортує зневоднені матеріал у контейнер-збірник (на схемі не показаний). Тим часом за допомогою гідроциліндра 2 і його гідропривода траверса 6 з пуансоном 7 піднімаються у граничне верхнє положення. Гідроциліндри 13 забезпечують установаження пластин 14 у пази пуансона 7. Далі пуансон опускається до упору пластин 14 в торець прес-форми 15. Заслінка 22 установажується у вихідне положення, повністю перекриваючи нижній переріз прес-форми. Відкриваються заслінки 29 й наступна порція матеріалу, що зневоднюється заповнює прес-форму. Далі описаний цикл

тристадійного зневоднення повторюється необхідне число разів у безперервному режимі при автоматизованому керуванні.

З врахуванням результатів теоретичних та експериментальних досліджень установок з ГПІ для багатокomпонентного віброударного пресування заготовок з непластичних порошкових матеріалів [239] та обладнання з ГПІ для однокомпонентного віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів [5], як основні параметри навантаження, реалізованого при використанні запропонованої установки (рисунок 8.5) приймаємо: частоту ν коливань вібростолу 26, амплітуду A його переміщень у вертикальному напрямку, максимальний кут повороту φ_{max} вібростолу навколо вертикальної осі, максимальні осьовий тиск $p_{o,max}$ та відцентрові зусилля $F_{e,max}$, створювані у середовищі порції матеріалу 17 у продовж циклу спрацьовування ГПІ на третій стадії зневоднення. Очевидно, що саме від цих параметрів, в першу чергу, залежить інтенсивність навантаження матеріалу, рухомість його твердих частинок та рідинної фази, а отже й показники економічної ефективності розглядуваних процесів.

Величина A дорівнюватиме попередньо установленому зазору між нижньою поверхнею вібростолу 26 і верхньою поверхнею станини 10. У випадках, коли вібростіл не доходить до станини й не вдаряється об неї ефективність віброударного зневоднення буде суттєво падати. Тому значення A залежить від положення гвинтів 28. Максимальна A_{max} , що може бути забезпечена при заданих параметрах ГПІ може бути наближено визначена з умови рівноваги

$$p_{1max} S_n + m_{\Sigma} g = c_{np.6} (z_n + z_{n.c} + A_{max}) + c_{np.2} A_{max}, \quad (8.22)$$

де p_{1max} – максимальне для даного ГПІ значення p_1 ; S_n – площа поршня гідроциліндра 2; m_{Σ} – сумарна маса рухомих елементів установки (поршня зі штоком гідроциліндра 2, траверси 6 з інерційними масами 4, пуансона 7 з гідроциліндрами 8, 12, прес-форми 15 із порцією оброблюваного матеріалу 17 та заслінкою 22, вібростолу 26 з напрямним кільцем 11); $c_{np.6}$, $c_{np.2}$ – жорсткості пружин 18, 27; z_n – попереднє стискання пружин 18 за допомогою гвинтів 9; $z_{n.c}$ – попереднє стискання пружин 18 під впливом сили тяжіння рухомих елементів

$$z_{n.c} = m_{\Sigma} g / c_{np.6}. \quad (8.23)$$

Тоді з формул (8.22, 8.23) отримуємо

$$A_{max} = \frac{p_{1max} S_n + m_{\Sigma} g - c_{np.6} (z_n + m_{\Sigma} g / c_{np.6})}{c_{np.6} + c_{np.2}}. \quad (8.24)$$

Вибрана A має бути менша за A_{max} , розраховану за формулою (8.24).

Частота ν лінійних переміщень вібростолу, що здійснюються при зміні тиску робочої рідини в поршневій порожнині гідроциліндра 2 за «трикутним» законом [239], може бути розрахована як

$$\nu = \frac{1}{t_{n.x} + t_{з.х}}, \quad (8.25)$$

де $t_{n.x}$, $t_{з.х}$ – тривалість прямого та зворотного ходів поршня гідроциліндра 2.

Аналіз осцилограм переміщень виконавчих елементів ГПП при прямих і зворотних ходах з віброзбуджувачами «на вході» та «на виході» показує, що вони мають в основному лінійний характер [5]. Якщо при цьому також знехтувати стисливістю робочої рідини в гідросистемі ГПП (при зміні тиску від $p_2 = 4$ МПа до $p_{1max} = 11$ МПа густина мінерального мастила марки АМГ-10 змінюється всього на 0,35% [205]), то $t_{n.x}$ можна наближено знайти як

$$t_{n.x} = Q_n / S_n \cdot A, \quad (8.26)$$

де Q_n – подача насоса ГПП.

При визначенні $t_{з.х}$ враховуємо, що на етапі повернення поршня гідроциліндра 2 у вихідне положення тиск у його поршневій порожнині, згідно із експериментально отриманими осцилограмами [5], зменшується до величини p_2 практично миттєво. Відповідне рівняння руху матиме вигляд

$$m_{\Sigma} a = c_{np.б} (z_n + m_{\Sigma} g / c_{np.б} + A) + c_{np.з} A - p_2 S_n - m_{\Sigma} g - R, \quad (8.27)$$

де R – сила тертя між напрямним кільцем 11 та гільзою, в якій воно переміщується, що наближено може бути визначена, як $R = 0,2 \cdot p_2 S_n$.

Кінцеву швидкість вібростолу 26 в момент повернення його у вихідне верхнє положення знаходимо як

$$v_{\kappa} = \sqrt{A \cdot a}. \quad (8.28)$$

Тоді $t_{з.х}$, з врахуванням формул (8.27, 8.28), може бути обчислена за виразом

$$t_{з.х} = \frac{v_{\kappa}}{a} = \frac{\sqrt{A \cdot a}}{a} = \sqrt{\frac{A}{a}} = \sqrt{\frac{A \cdot m_{\Sigma}}{c_{np.б} (z_n + m_{\Sigma} g / c_{np.б} + A) + c_{np.з} A - 1,2 \cdot p_2 S_n - m_{\Sigma} g}}. \quad (8.29)$$

У роботі [5] наведені формули для визначення тривалості кожного з чотирьох етапів роботи ГП з вібробуджувачем «на вході» при «імпульсному» законі зміни тиску у гідроциліндрі привода [5, 239] (за даним законом відбувається зміна тиску у порожнинах гідроциліндрів 19 розглядуваної установки). У продовж двох перших з вказаних етапів тривалістю t_I , t_{II} плунжери гідроциліндрів здійснюють прямий хід, на третьому етапі тривалістю t_{III} відбувається їх повернення у вихідні положення, у продовж четвертого етапу тривалістю t_{IV} при нерухомих плунжерах гідроциліндрів 19 у гідроаккумуляторах ГП накопичується енергія для здійснення наступного циклу [5, 239]. Оскільки гідроциліндри 2, 19 мають загальний ГП з одним восьмилінійним вібробуджувачем [239], необхідно, щоб виконувалась умова з врахуванням якої вибираються параметри ГП, що визначають t_I , t_{II} , t_{III} , t_{IV} .

$$\frac{1}{t_I + t_{II} + t_{III} + t_{IV}} \leq v. \quad (8.30)$$

Значення $p_{o.max}$ в момент часу $t = t_{3.x}$ обчислюємо за формулами

$$p_{o.max} = \frac{F_{mzIImax} + F_{mzIIImax}}{S_m}; \quad F_{mzIImax} = p_1 S_n + m_I (a - g); \quad (8.31)$$

$$F_{mzIIImax} = m_{II} (a - g) + c_{np.6} (z_n + m_{\Sigma} g / c_{np.6} + A) + c_{np.2} A - 0,2 \cdot p_1 S_n,$$

в яких $F_{mzIImax}$, $F_{mzIIImax}$ – зусилля створювані на нижньому перерізі пуансона 7 та на верхній поверхні заслінки 22; m_I , m_{II} – маси верхнього виконавчого елемента установки (включає маси поршня та штока гідроциліндра 2, траверси 6 з інерційними масами 4, пуансона 7 з гідроциліндрами 8, 12) та нижнього виконавчого елемента (дорівнює сумі мас прес-форми 15 із порцією оброблюваного матеріалу 17 та заслінкою 22, а також вібростолу 26 з напрямним кільцем 11); S_m – площа поперечного перерізу порції матеріалу 17.

Для визначення φ_{max} складаємо рівняння руху при повороті навколо вертикальної осі вібростолу 26 з напрямним кільцем 11, прес-форми 15 із заслінкою 22 та порцією матеріалу 17, а також пуансона 7 з гідроциліндрами 8, 12 на першому етапі зміни тиску у порожнинах гідроциліндрів 19

$$J_{\Sigma} \ddot{\varphi} = 2 \cdot p_1 S_{nl} r - 2 \cdot c_{np.6} \phi \cdot r^2 - (F_{mzIImax} + F_{mzIIImax}) f_m d_n / 2; \quad 0 \leq t \leq t_I, \quad (8.32)$$

де J_{Σ} – сумарний момент інерції вказаних вище обертових елементів установки; φ – поточне значення кута їх повороту; r – радіус вібростолу 26; S_{nl} – площа плунжерів гідроциліндрів 19; f_m – зведений коефіцієнт тертя підшипника 5 [164]; d_n – внутрішній діаметр підшипника.

За допомогою рівняння (8.32) знаходимо значення $\phi_{\max I} = \phi(t_I)$.

Далі складаємо рівняння руху при повороті обертових елементів установки на другому етапі зміни тиску у порожнинах гідроциліндрів 19

$$J_{\Sigma} \ddot{\phi} = 2 \cdot c_{np.6} \phi \cdot r^2 - (F_{mzI \max} + F_{mzII \max}) f_m d_n / 2; \quad t_I < t \leq t_{II}, \quad (8.33)$$

за допомогою якого визначаємо $\phi_{\max II} = \phi(t_{II})$.

Тоді значення ϕ_{\max} знаходимо як

$$\phi_{\max} = \phi_{\max I} + \phi_{\max II}. \quad (8.34)$$

Величину $F_{\phi, \max}$ розраховуємо за формулою

$$F_{\phi, \max} = m_M \omega_{\max I}^2 \sqrt{\frac{S_M}{\pi}}, \quad (8.35)$$

де m_M – маса порції матеріалу 17; $\omega_{\max I}$ – кутова швидкість порції 17 в момент часу $t = t_I$ визначається за допомогою рівняння (8.32) як $\omega_{\max I} = \dot{\phi}(t_I)$.

З врахуванням наведених вище експериментальних даних визначимо ефективність пропонованої установки (див. рисунок 8.5) у порівнянні із ефективністю обладнання для однокомпонентного віброударного зневоднення [242] при реалізації першої стадії пропонованої послідовності зневоднення.

Добова продуктивність попереднього однокомпонентного – $\Pi_{3,0}$ та двокомпонентного – $\Pi_{3,0}$ віброударного зневоднення складатиме

$$\Pi_{3,0} = \frac{S_{M,0} H_M \rho_M}{t_{10} + t_{n1} + t_3 + t_{n2}} t_{3M} n_{3M} = \frac{1,3 \cdot 0,2 \cdot 998 \cdot 3600}{13 + 2 + 10 + 2} 8 \cdot 3 = 830,3 \text{ м}; \quad (8.36)$$

$$\Pi_{3,0} = \frac{S_{M,0} H_M \rho_M}{t_{10} + t_{n1} + t_3 + t_{n2} + t_{nl}} t_{3M} n_{3M} = \frac{2,99 \cdot 0,2 \cdot 998 \cdot 3600}{11 + 2 + 10 + 2 + 2} 8 \cdot 3 = 1909,8 \text{ м},$$

де ρ_M – початкова густина оброблюваного матеріалу; t_{10} , t_{10} , t_{n1} , t_3 , t_{n2} , t_{nl} – тривалість першої стадії зневоднення при однокомпонентному і двокомпонентному зневодненні, тривалість відкривання заслінок 29

(рисунок 8.5), заповнення матеріалом прес-форми 15, закривання заслінок 29 (в установці для однокомпонентного зневоднення використовується аналогічна система заповнення прес-форми), установлення пластин 14 у пази пуансона 7 та їх відсування після зневоднення (в попередній установці пластин 14 та їх привода немає, тому для неї дана складова не враховується); $t_{зм}$ – середня тривалість безперервної роботи обладнання у продовж однієї зміни; $n_{зм}$ – кількість змін у продовж доби.

Енергоємність однокомпонентного – $E_{з.о}$ та двокомпонентного – $E_{з.д}$ віброударного зневоднення розраховуємо як [242]

$$E_{з.о} = \frac{N_{\partial 1}(t_{n1} + t_{n2}) + N_{ГПП}t_{1o}}{S_{м.о}H_{м\rho.м}(U_n - U_{к1o})}; \quad E_{з.д} = \frac{N_{\partial 1}(t_{n1} + t_{n2}) + N_{\partial 2}t_{nl} + N_{ГПП}t_{1o}}{S_{м.д}H_{м\rho.м}(U_n - U_{к1d})}, \quad (8.37)$$

де $N_{\partial 1}$, $N_{\partial 2}$ – потужності насосної станції допоміжного привода при переміщенні заслінок 29 та пластин 14; $N_{ГПП}$ – потужність насосної станції ГПП.

Значення $N_{\partial 1}$, $N_{ГПП}$ установки для однокомпонентного віброударного зневоднення були розраховані у роботі [242]. Потрібна $N_{ГПП}$ при двокомпонентному зневодненні буде такою самою, як й при однокомпонентному, оскільки прямий хід плунжерів гідроциліндрів 19, що забезпечують прикладання другої компоненти віброударного навантаження, відбувається в основному за рахунок розрядки гідроаккумуляторів, які заряджаються під час прямого ходу поршня гідроциліндра 2.

Значення $N_{\partial 2}$ визначаємо як [242]

$$N_{\partial 2} = \frac{(S_{n12}t_{nl} + S_{u12}t_{nl}) \cdot l_{x12}p_{\partial 2}}{\eta_{е.д2} \cdot \eta_{н.д2} \cdot \eta_{м.д2}} = \frac{(7,85 \cdot 10^{-5} \cdot 1 + 5,9 \cdot 10^{-5} \cdot 1) \cdot 0,1 \cdot 1 \cdot 10^6}{0,87 \cdot 0,82 \cdot 0,98} = 19,65 \text{ Вт}, \quad (8.38)$$

де S_{n12} , S_{u12} – площі поршнів гідроциліндрів 12 з боку поршневої і штокової порожнин; l_{x12} – хід поршнів гідроциліндрів 12; $p_{\partial 2}$ – потрібний номінальний тиск у нагнітальній гідролінії привода; $\eta_{е.д2}$, $\eta_{н.д2}$, $\eta_{м.д2}$ – ККД електродвигуна, насоса та муфти привода.

Тоді енергоємність за формулами (8.37)

$$E_{з.о} = \frac{157 \cdot (2 + 2) + 12203,5 \cdot 13}{1,3 \cdot 0,2 \cdot 998 \cdot (0,95 - 0,85)} \frac{3600}{1000 \cdot 1000} = 22,1 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м};$$

$$E_{з.д} = \frac{157 \cdot (2 + 2) + 19,65 \cdot 2 + 12203,5 \cdot 11}{2,99 \cdot 0,2 \cdot 998 \cdot (0,95 - 0,83)} \frac{3600}{1000 \cdot 1000} = 6,78 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м},$$

що доводить нам порівняно високу економічну ефективність пропонованої установки.

Аналіз розробленої схеми установки показує, що вона в основному відповідає сформульованим вище вимогам. Зокрема, установка дозволяє реалізувати тристадійне двокомпонентне віброударне зневоднення вологих дисперсних матеріалів у періодичному автоматизованому режимі, в прес-формі закритого типу, з підвищенням від стадії до стадії інтенсивності робочого процесу. Витрати допоміжного часу при використанні пропонованої установки є мінімальними, в її приводі передбачена можливість для простого безступінчастого і точного регулювання в широких межах параметрів навантаження матеріалу. Показники негативного впливу з боку установки на людину й навколишнє середовище не перевищують відповідних показників іншого вібропресового обладнання з ГП. За результатами виконаних автором розрахунків, підтвердженими експериментальними даними, у порівнянні із установкою для однокомпонентного віброударного зневоднення пропонована установка забезпечує у 2,3 рази вищу продуктивність попереднього зневоднення кавового шламу при істотно нижчій (у 3,3 рази) енергоємності робочого процесу й меншій кінцевій вологості (83 % проти 85 %) оброблюваного матеріалу. Щоправда реалізація у розробленій установці додаткової компоненти віброударного навантаження обумовила необхідність у певному ускладненні її конструкції та збільшенні матеріалоемності, але ці недоліки є, на думку авторів, не такими суттєвими і повністю перекриваються позитивним ефектом при використанні установки у промисловості.

На рисунку 8.6 представлена спрощена конструктивна схема технологічного комплексу для зневоднення вологих дисперсних матеріалів в складі шнекового преса та гідроімпульсної вібропресової установки [243].

Шнековий прес, закріплений на рамі 7 містить планетарний мотор-редуктор 1, що через пружну муфту 2 приводить в обертання шнек 3, розташований у внутрішньому циліндрі 4. У станках останнього виконане велике число дрібних наскрізних отворів (на схемі не показані), закритих з середини фільтрувальною сіткою. Внутрішній циліндр 4 установлений в середині зовнішнього циліндра 5 порожнина якого за допомогою трубки 29 пов'язана з баком 16. В свою чергу, циліндр 4 сполучається через гофрований гумовотканинний рукав 6 з прес-формою гідроімпульсної вібропресової установки, що складається з днища 25 та двох бокових стінок 31, у яких виконані наскрізні дрібні отвори 22, 30, закриті з середини фільтрувальною сіткою. Днище 25 жорстко пов'язане із плунжером гідроциліндра 27 гідроімпульсного привода (ГП) [64]. Гідроциліндр змонтовано на верхній поперечині 14 станини установки, що включає також колони 12 й нижню поперечину 13, установлену на

віброопорах. Прес-форма пружно пов'язана із поперечиною 14 за допомогою чотирьох пружин 15, якими у вихідному положенні підтискається до запліччя поперечини та до чотирьох упорів 20. Пуансон 10 з виступами 21 на нижній поверхні утримується над днищем 25 чотирма пружинами 18, що спираються на планки 19, жорстко прикріплені до стінок 31. З пружинами 18 пуансон зв'язують прикріплені до нього планки 24, що навантажені інерційними масами 8, одягнутими на штифти 9.

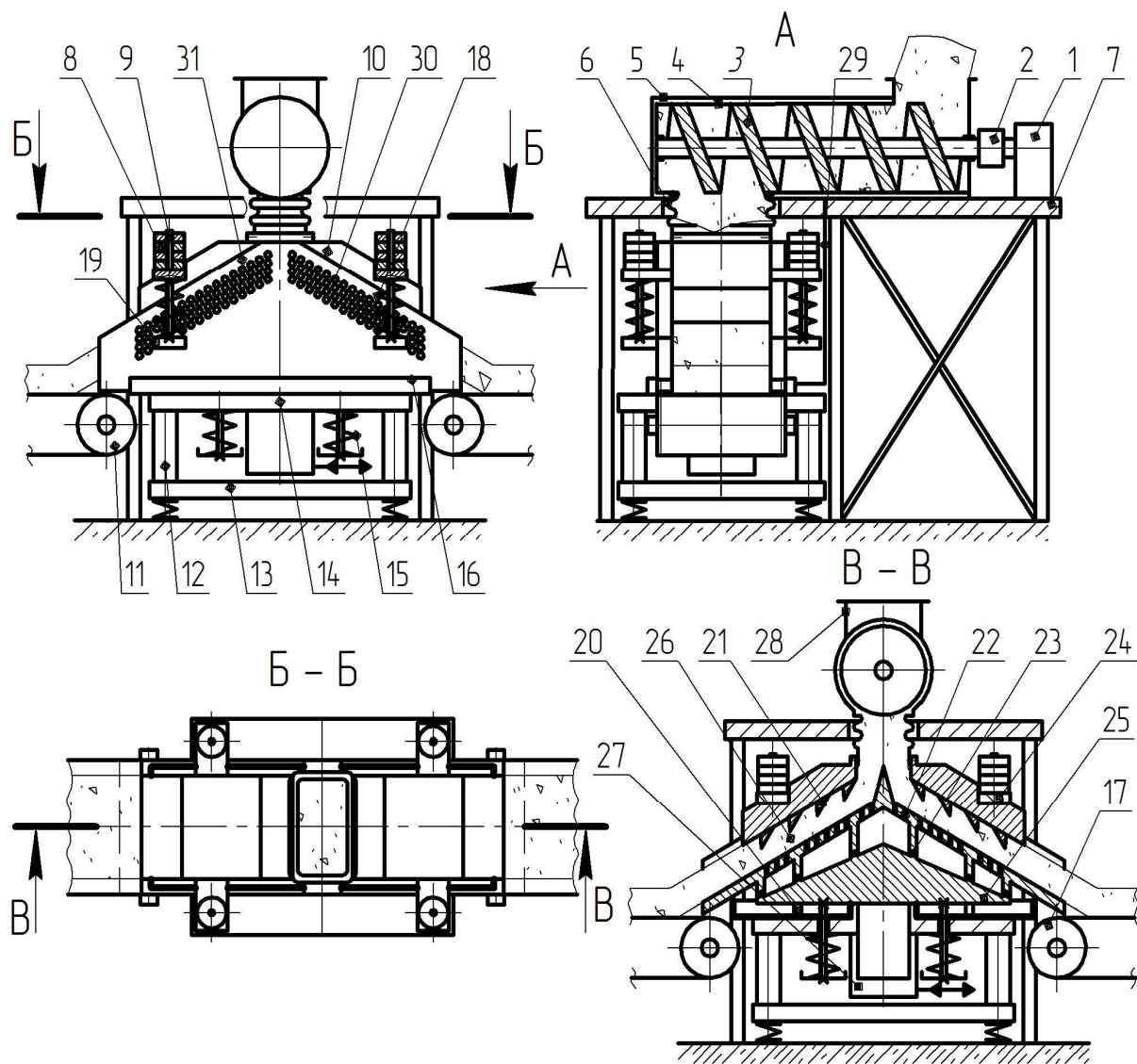


Рисунок 8.6 - Спрощена конструктивна схема технологічного комплексу для зневоднення вологих дисперсних матеріалів

Працює технологічний комплекс таким чином. Оброблюваний матеріал з початковою вологістю $U_n = 90 - 95\%$ подається безперервним потоком через патрубок 28 у шнековий прес, шнек 3 якого обертається, стискаючи матеріал у внутрішньому циліндрі 4. Видалена з нього рідина стікає через фільтрувальну сітку, що затримує тверді частинки матеріалу. Далі рідина проходить через отвори у циліндрі 4, збирається у

зовнішньому циліндрі 5 й по трубці 29 відводиться у бак 16. Попередньо зневоднена до вологості 70 – 75% тверда фаза матеріалу витискається з циліндра 4 і через гумовотканинний рукав 6 подається у прес-форму гідроімпульсної вібропресової установки, у порожнину між днищем 25, пуансоном 10 та боковими стінками 31. Матеріал безперервно переміщується уздовж цієї порожнини (див. розріз В – В на рисунку 8.6) до стрічкових конвеєрів 11, 17. У порожнині гідроциліндра 27 гідроімпульсного привода періодично змінюється тиск робочої рідини в діапазоні від 4 до 11 МПа. Так, при збільшенні тиску плунжер гідроциліндра 27 й разом з ним прес-форма з оброблюваним матеріалом 26 всередині швидко піднімаються вгору з прискоренням, що дорівнює $(8 \div 10)g$ [64]. При цьому стискаються пружини 15, а матеріал 26 піддається інерційному навантаженню, що створює пуансон 10 з інерційними масами 8. Під час різкого падіння тиску робочої рідини у порожнині гідроциліндра 27 прес-форма з матеріалом 26 та пуансон 10 з масами 8 під дією сили власного тяжіння та сили пружності стиснених пружин 15 опускаються у вихідне нижнє положення з ударом днища 25 наприкінці ходу об запліччя поперечини 14 та об упори 20. Даний ударний імпульс передається нижнім шарам матеріалу 26. Одночасно їх верхні шари стискаються підпружиненим відносно прес-форми пуансоном 10. Таким чином, при повторенні описаного циклу прес-форма та пуансон здійснюють вертикальні зворотно-поступальні переміщення з частотою ν до 60 Гц і амплітудою a до 2,5 мм, внаслідок чого матеріал 26, який переміщується від рукава 6 до конвеєрів 11, 17 піддається віброударному інерційному навантаженню, що сприяє інтенсивному видаленню з нього рідкої фази. Остання проходить через отвори 22, 30, закриті з середини фільтрувальною сіткою й стікає по отворах 23 та по стінках 31 у бак 16, звідки йде на фільтрування. Зневоднена у прес-формі до вологості 25 – 30% тверда фаза матеріалу скидається на конвеєри 11, 17.

Перевагами даної схеми установки для віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів у порівнянні із схемами пропонованими раніше [5] є простота конструкції, надійність, забезпечення безперервності робочого процесу, а також те, що при використанні установки практично усувається ймовірність забивання прес-форми твердою фазою матеріалу, що зневоднюється. Крім цього, під час проектування креслень установки може бути використано багато добре відпрацьованих й перевірених на практиці конструкцій вузлів іншого вібропресового обладнання [64].

Розглянемо цикл віброударного навантаження вологого дисперсного матеріалу у прес-формі на гідроімпульсній установці (див. рисунок 8.6). На рисунку 8.7 представлені осцилограми зміни тиску p_2 робочої рідини у гідроциліндрі ГП з вібробуджувачем «на вході» [64] та переміщення z_1 вібростолу експериментального гідроімпульсного стенда-прототипу

установки при віброударному зневодненні на ньому порції концентрату кавового шламу.

На I-му етапі навантаження матеріалу при збільшенні p_z від мінімального – $p_{z.min}$ до максимального – $p_{z.max}$ значення (див. рисунок 8.7, а) відбувається швидке переміщення прес-форми з матеріалом з вихідного у верхнє положення, що характеризуються координатами z_{Imin} , z_{Imax} (див. рисунок 8.7, б). Одночасно має місце переміщення пуансона z_{II} , але внаслідок пружної деформації матеріалу під впливом сили інерції пуансона і інерційних мас, величина z_{II} у будь-який момент часу I-го етапу буде меншою за z_I . Поточні значення z_I та z_{II} на даному етапі визначаємо за допомогою диференціальних рівнянь руху

$$m_I(\ddot{z}_I + g) = p_{z.max} S_z - \dot{z}_I(\alpha_I + \alpha_e) - c_d(z_{0d} + z_I) - c_n(z_{0n} + z_I) - c_e z_I - R_I; \quad (8.39)$$

$$m_{II}(\ddot{z}_{II} + g) = c_n(z_{0n} + z_I - z_{II}) + c_e(z_I - z_{II}) - \dot{z}_{II}\alpha_e; \quad 0 \leq t \leq t_I, \quad (8.40)$$

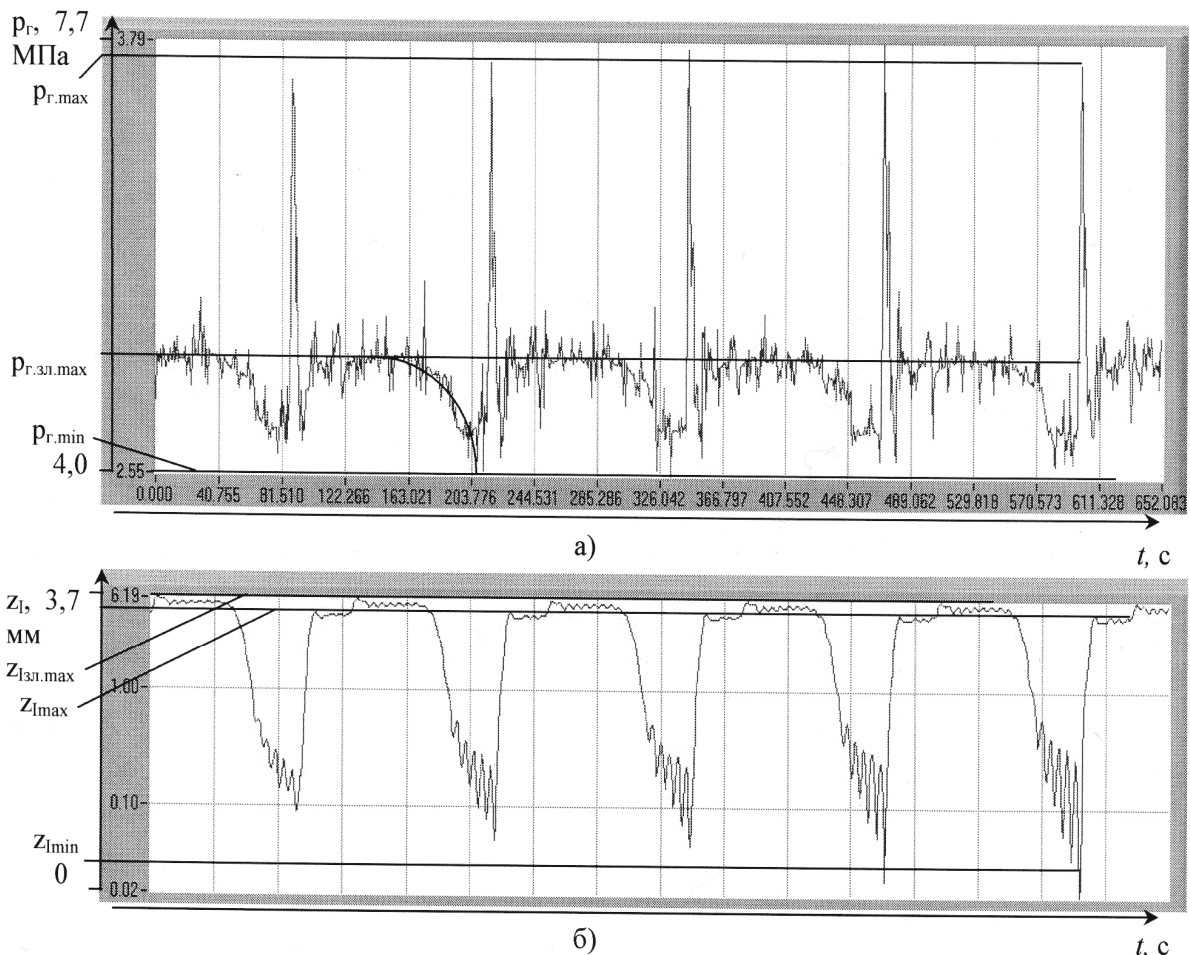


Рисунок 8.7 - Осцилограми зміни: а – тиску p_z робочої рідини у гідроциліндрі ГП; б – переміщення z_I вібростолу експериментального гідроімпульсного стенда при віброударному зневодненні на ньому порції концентрату кавового шламу

де m_I – маса нижнього виконавчого елемента установки (включає маси плунжера гідроциліндра 27, днища 25, стінок 31, порції матеріалу 26 та планок 19 – див. рисунок 8.6); m_{II} – маса верхнього виконавчого елемента установки (включає маси пуансона 10, штифтів 9 та планок 24, а також інерційні маси 8); S_z – площа поперечного перерізу плунжера гідроциліндра 27; α_1, α_B – коефіцієнти в'язкого демпфірування при переміщенні плунжера гідроциліндра 27 та твердих частинок матеріалу у прес-формі [5]; c_d, c_n – коефіцієнти жорсткості пружин, що пов'язані з днищем 25 та з пуансоном 10; c_e – коефіцієнт жорсткості під час пружного деформування матеріалу 26; z_{0d}, z_{0n} – попереднє стискання пружин, що пов'язані з днищем 25 та з пуансоном 10; R_I – сила сухого тертя в ущільненнях плунжера гідроциліндра 27 (може бути визначена за методикою [244]); t_I – тривалість I-го етапу циклу навантаження, що відповідає тривалості відкриття t_o віброзбуджувача ГПІ установки, приєднаного за схемою «на вході» [5, 64].

На II-му етапі навантаження матеріалу у прес-формі тиск p_z спочатку падає від $p_{z,max}$ до $p_{z,min}$, а далі дещо піднімається до $p_{z,зл,max}$ (див. рисунок 8.7, а), що обумовлено, на нашу думку, ударно-хвильовими процесами у зливній гідролінії ГПІ [5, 205]. Завдяки цьому вібростіл стенду-прототипу у продовж практично всього розглядуваного етапу утримується засиллям, створеним тиском робочої рідини $p_{z,зл,max}$ у верхньому граничному положенні з координатою $z_{I,зл,max}$ (див. рисунок 8.7, б), здійснюючи лише незначні за амплітудою коливання згідно із синусоїдальним законом. Оскільки амплітуда цих коливань складає біля 1% від величини $z_{I,зл,max}$, їх можна не брати до уваги і з метою спрощення аналізу вважати, що на II-му етапі прес-форма, а отже й верхній виконавчий елемент стенду є нерухомими:

$$z_I(t) = z_I(t_I); \quad z_{II}(t) = z_{II}(t_I); \quad t_I < t \leq t_{II}, \quad (8.41)$$

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

На III-му етапі в результаті затухання ударно-хвильових процесів у зливній гідролінії ГПІ тиск p_z зменшується від $p_{z,зл,max}$ до $p_{z,min}$ (див. рисунок 8.7, а), таким чином, вібростіл повертається у вихідне положення (координата $z_{I,min}$ – див. рисунок 8.7, б). Змодельовати зміну p_z на розглядуваному етапі достатньо складно, тому можна з достатньо високою точністю описати її за допомогою емпіричної формули (рівняння еліпса), складеної за відповідною ділянкою осцилограми (див. рисунок 8.7, а). Апроксимована залежність p_z на III-му етапі показана на осцилограмі тонкою плавною кривою

$$p_z(t) = \sqrt{1 - \frac{(t - 0,063)^2}{0,063^2}} + 4; \quad t_{II} < t \leq t_{III}, \quad (8.42)$$

де t_{III} – тривалість III-го етапу за осцилограмою на рисунку 8.7, б приблизно дорівнює одній третині періоду T_u циклу віброударного навантаження. Тобто

$$t_{III} = \frac{1}{3} T_u = \frac{1}{3 \cdot \nu}, \quad (8.43)$$

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

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

На практиці для отримання залежності для розрахунку $p_z(t)$ на будь-якому іншому режимі роботи установки для зневоднення матеріалу достатньо зняти на цьому режимі на стенді-прототипі осцилограму $p_z(t)$ і скласти за нею для III-го етапу робочого циклу відповідну емпіричну формулу (як показали проведені нами численні дослідження зі зневоднення на стенді-прототипі різних вологих дисперсних матеріалів (відходів харчових виробництв), їх вид не впливає на характер залежності $p_z(t)$ [5]).

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

$$m_I(\ddot{x} + g) = p_z(t) \cdot S_z + \ddot{x}(\alpha_I + \alpha_e) - c_o(z_{0o} + z_{I \max} - z_I) - \quad t_{II} < t \leq t_{III}; \quad (8.44)$$

$$- c_n(z_{0n} + z_{I \max} - z_{I \max} - z_I) - c_e(z_{I \max} - z_I) + R_I;$$

$$m_{II}(\ddot{x} + g) = c_n(z_{0n} + z_{I \max} - z_I + z_{II}) + c_e(z_{I \max} - z_{I \max} - z_I + z_{II}) - \ddot{x} \alpha_e, \quad (8.45)$$

де $z_{I \max}$ та $z_{II \max}$ визначаються за рівняннями (8.39, 8.40) для моменту часу $t = t_I$.

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

На I-му етапі циклу при переміщенні прес-форми вгору стискатись будуть в основному ділянки матеріалу, що прилягають до днища 1 та до пуансона 2 (рисунок 8.8). Товщини нижнього – h_{nI} та верхнього – h_{eII} стиснених шарів на даному етапі будуть відповідати переміщенням днища – z_I та пуансона z_{II} , тобто

$$h_{nI}(t) = z_I(t) \cdot \cos \gamma; \quad h_{eI}(t) = (z_I(t) - z_{II}(t)) \cdot \cos \gamma; \quad 0 \leq t \leq t_I, \quad (8.46)$$

де γ – кут нахилу верхньої робочої поверхні днища 1 (рисунок 8.8).

Тиски у нижньому – $p_{в.нI}$ та у верхньому – $p_{в.вII}$ стиснених шарах визначаємо з використанням відповідних рівнянь руху (8.39, 8.40)

$$p_{в.нI}(t) = \frac{p_{z.\max} S_z - m_I(\ddot{z}_I + g) - \frac{1}{2}(\alpha_I + \alpha_6) - c_o(z_{0o} + z_I) - c_n(z_{0n} + z_I) - c_6 z_I - R_I}{S_o}; \quad (8.47)$$

$$p_{в.вI}(t) = \frac{c_n(z_{0n} + z_I - z_{II}) + c_6(z_I - z_{II}) - \frac{1}{2}\alpha_6 - m_{II}(\ddot{z}_{II} + g)}{S_n}; \quad 0 \leq t \leq t_I, \quad (8.48)$$

де S_o , S_n – площі верхньої поверхні днища та нижньої поверхні пуансона (при визначенні S_o від добутку довжини L_o й B_n ширини даної поверхні слід відняти площу поперечного перерізу всіх виконаних у днищі отворів 3: $S_o = L_o B_n - S_{o\Sigma}$); площа визначається як $S_n = L_{n2} B_n$.

Тиск у середніх шарах матеріалу у прес-формі – $p_{в.сI}(t)$ буде залежати в основному від сили інерції пуансона 2 з інерційними масами 4 та від сили пружності, створюваної пружинами, що зв'язують пуансон з прес-формою (див. також рисунок 8.6)

$$p_{в.сI}(t) = \frac{m_{II} g - c_n z_{0n}}{S_n}; \quad 0 \leq t \leq t_I, \quad (8.49)$$

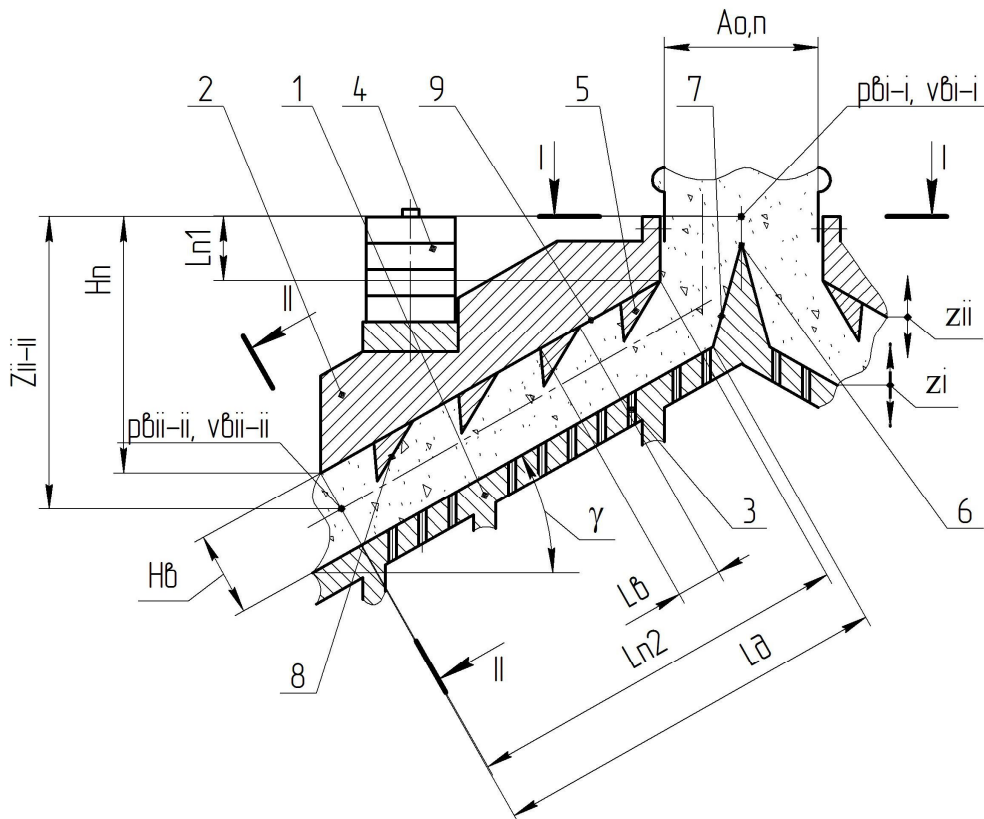


Рисунок 8.8 - Схема навантаження та руху матеріалу у прес-формі установки для віброударного зневоднення

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

$$h_{cI}(t) = H_{\varepsilon} - h_{nI}(t) - h_{eI}(t); 0 \leq t \leq t_I, \quad (8.50)$$

де H_{ε} – початкова товщина шару оброблюваного матеріалу у прес-формі.

На II-му етапі циклу при практично нерухомих пуансоні та прес-формі матеріал у останній піддається в основному статичному навантаженню, створюваного силою тяжіння пуансона 2 з інерційними масами 4, а також силою пружності стиснених пружин. Підвищений тиск $p_{\varepsilon.nI}(t)$, $p_{\varepsilon.eI}(t)$ створений на попередньому етапі у нижніх та верхніх шарах прес-форми в результаті переміщень днища та пуансона, на II-му етапі поширюється хвилями у середніх шарах [5]. Відбувається рівномірне перерозподілення твердих частинок матеріалу у прес-формі з його більш щільним укладанням та витисканням з проміжків твердими частинками матеріалу рідини, яка в решті решт витискається з прес-форми [5, 64]. Але вказані коливання твердих частинок досить швидко затухають, тому можна з високим ступенем наближення вважати, що тиск $p_{\varepsilon.II}(t)$ у середовищі оброблюваного матеріалу у прес-форми на розглядуваному етапі є приблизно однаковим по її висоті й рівним

$$p_{\varepsilon.II}(t) = \frac{m_{II}g + c_n(z_{0n} + z_{I\max} - z_{I\max}) - c_{\varepsilon}(z_{I\max} - z_{I\max})}{S_n}; t_{II} < t \leq t_{III}. \quad (8.51)$$

На III-му етапі циклу віброударного зневоднення виконавчі елементи установки рухаються вниз. При цьому у верхніх шарах матеріалу у прес-формі, що прилягають до пуансона та в їх нижніх шарах, які контактують із днищем, виникатиме розрідження. Внаслідок того, що швидкості переміщення виконавчих елементів у вихідні нижні положення є меншими, ніж швидкості їх переміщення вгору на I-му етапі (див. рисунок 8.7, б), тиск $p_{\varepsilon.cIII}(t)$ у середніх шарах буде також встигати змінюватись. Останнє обумовлене збільшенням об'єму, що займає матеріал у прес-формі [5, 5]. Хвилі тиску $p_{\varepsilon.cIII}(t)$, що вирівнює будуть відходити від верхньої і нижньої меж середнього шару матеріалу у прес-формі в напрямках до пуансона 2 та до днища 1. Швидкості переміщення вказаних хвиль буде приблизно відповідати швидкості руху виконавчих елементів установки. Таким чином, з врахуванням рівнянь (8.44, 8.45), залежності для визначення тиску у нижніх – $p_{\varepsilon.nIII}(t)$, середніх – $p_{\varepsilon.cIII}(t)$ та верхніх – $p_{\varepsilon.eIII}(t)$ шарах матеріалу у прес-формі на III-му етапі циклу, матимуть вигляд

$$p_{\epsilon,III}(t) = \left[\begin{array}{l} p_2(t) \cdot S_2 + \alpha_1(\alpha_I + \alpha_\epsilon) - m_I(\alpha_I + g) - c_\partial(z_{0\partial} + z_{I\max} - z_I) - \\ - c_n(z_{0n} + z_{I\max} - z_{I\max} - z_I) - c_\epsilon(z_{I\max} - z_I) + R_I \end{array} \right] / S_\partial; \quad t_{II} < t \leq t_{III}; \quad (8.52)$$

$$\begin{aligned} p_{\epsilon,cIII}(t) &= p_{\epsilon II}(t) - \frac{\Delta V_{\epsilon III} K_\epsilon}{V_{\epsilon II}} = \\ &= p_{\epsilon II}(t) - \frac{[z_I(t) \cdot B_n L_\partial \cos \gamma + (z_I(t) - z_{II}(t)) \cdot B_n L_{n2} \cos \gamma] K_\epsilon}{H_\epsilon - h_{nI\max} - h_{\epsilon I\max}} = \end{aligned} \quad (8.53)$$

$$\begin{aligned} &= p_{\epsilon II}(t) - \frac{[z_I(t) \cdot L_\partial + (z_I(t) - z_{II}(t)) \cdot L_{n2}] B_n K_\epsilon \cos \gamma}{H_\epsilon - [z_{I\max} \cdot L_\partial + (z_{I\max} - z_{II\max}) \cdot L_{n2}] B_n \cos \gamma} = \\ &= p_{\epsilon II}(t) - \frac{[z_I(t) \cdot L_\partial + (z_I(t) - z_{II}(t)) \cdot L_{n2}] K_\epsilon}{H_\epsilon - [z_{I\max} \cdot L_\partial + (z_{I\max} - z_{II\max}) \cdot L_{n2}]}; \end{aligned}$$

$$p_{\epsilon,\epsilon III}(t) = \frac{c_n(z_{0n} + z_{I\max} - z_I + z_{II}) + c_\epsilon(z_{I\max} - z_{I\max} - z_I + z_{II}) - \alpha_1 \alpha_\epsilon - m_{II}(\alpha_{II} + g)}{S_n}, \quad (8.54)$$

де $\Delta V_{\epsilon III}$ – зміна робочого об'єму прес-форми на III-му етапі; $V_{\epsilon II}$ – робочий об'єм прес-форми на II-му етапі; K_ϵ – модуль об'ємної пружності вологого дисперсного матеріалу [5, 205].

Розрідження $p_{\epsilon,\epsilon III}(t)$, $p_{\epsilon,III}(t)$ (див. формули 8.52, 8.54), на нашу думку, виникатимуть на даному етапі тільки у мінімальних за товщиною шарах матеріалу у прес-формі, що безпосередньо прилягають до робочих поверхонь днища 1 та пуансона 2. В основному ж об'ємі прес-форми на III-му етапі тиск буде дорівнювати $p_{\epsilon,cIII}(t)$ (див. формулу 8.53).

Також під час віброударного зневоднення матеріалу тиск в його середовищі створюється завдяки опору при рівномірному переміщенні матеріалу від входу у прес-форму до виходу з неї. Дане переміщення забезпечується шнековим пресом, а опір переміщенню створюється за рахунок внутрішнього тертя у середовищі матеріалу та під час проходження ним місцевих опорів – вхідного та вихідного перерізів пуансона, а також виступів 5 [205]. Для визначення даних опорів потрібно прийняти ще одне припущення. У роботі [43] обґрунтовано, що під час вібраційного навантаження вологих дисперсних матеріалів, до яких відносяться й розглядувані вологі дисперсні матеріали, у випадку переміщення їх частинок з прискореннями, що перевищують g , матеріали переходять у стан віброкипіння. В даному стані матеріал поводить себе, як

Ньютонівська рідина, що дозволяє суттєво спростити аналіз процесів його зневоднення.

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

Зокрема, рівняння Бернуллі [205] для вхідного I – I та вихідного II – II перерізів матиме вигляд

$$Z_{II-II} + \frac{p_{eI-I}(t)}{\rho_e(t) \cdot g} + \frac{v_{eI-I}^2}{2 \cdot g} = \frac{p_{eII-II}}{\rho_e(t) \cdot g} + \frac{v_{eII-II}(t)^2}{2 \cdot g} + h_{\Sigma}(t); \quad 0 \leq t \leq t_{III}, \quad (8.55)$$

де Z_{II-II} – вертикальна координата центру ваги перерізу I – I відносно центру ваги перерізу II – II у продовж циклу віброударного навантаження; $p_{eI-I}(t)$, p_{eII-II} , v_{eI-I} , $v_{eII-II}(t)$ – поточні тиски та середні швидкості частинок потоку відходів у перерізах I – I та II – II; $\rho_e(t)$ – поточна середня густина матеріалу; $h_{\Sigma}(t)$ – сумарні втрати напору потоку матеріалу між перерізами I – I та II – II, обумовлені внутрішнім тертям в його середовищі та місцевими опорами [205].

Величину Z_{II-II} знаходимо за формулою

$$Z_{II-II} = H_n + \frac{H_e}{2} \cos \gamma, \quad (8.56)$$

де H_n – висота пуансона 2.

Густину $\rho_e(t)$ визначаємо як [205]

$$\rho_e(t) = \frac{\rho_e}{1 - \beta_e p_e(t)}; \quad 0 \leq t \leq t_{III}, \quad (8.57)$$

де ρ_e – густина оброблюваного матеріалу при тій же самій температурі та при атмосферному тиску [5]; β_e – коефіцієнт об'ємного стискання матеріалу [5, 205]; $p_e(t)$ – поточний середній тиск у середовищі матеріалу, що для I-го етапу ($0 \leq t \leq t_I$) визначається за рівнянням (8.49), для II-го етапу ($t_I < t \leq t_{II}$) – за рівнянням (8.51), а для III-го етапу ($t_{II} < t \leq t_{III}$) – за рівнянням (8.53).

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

Швидкості v_{I-I} , $v_{II-II}(t)$ знаходимо, виходячи із заданої продуктивності Q зневоднення, що в свою чергу, залежить від добової маси $m_{e,d}$ матеріалу

на підприємстві та від тривалості t_p роботи установки для зневоднення у продовж доби

$$v_{\text{вІ-І}} = \frac{Q}{A_{o,n} B_n} = \frac{m_{\text{в.д}}}{\rho_{\text{в}} t_p A_{o,n} B_n}; v_{\text{вІІ-ІІ}}(t) = \frac{m_{\text{в.д}}}{2 \cdot \rho_{\text{в}} t_p B_n [H_{\text{в}} - (z_I + z_{II}) \cos \gamma]}; 0 \leq t \leq t_{III}, \quad (8.58)$$

де $A_{o,n}$ – ширина отвору у пуансоні.

Втрати $h_{\Sigma}(t)$ знаходимо з використанням формул Дарсі та Вейсбаха [205]

$$h_{\Sigma}(t) = \frac{v_{\text{вІ-І}}^2}{2 \cdot g} \lambda_{\text{вІ}} \frac{L_{n1}}{D_{\text{в.з1}}} + \frac{v_{\text{вІІ-ІІ}}(t)^2}{2 \cdot g} \left[\lambda_{\text{вІІ}}(t) \frac{L_{n2} - 4 \cdot L_{\text{в}}}{D_{\text{в.з2}}(t)} + (\zeta_{\text{вх}} + \zeta_p + \zeta_n + 4 \cdot \zeta_{\text{зв}} + 4 \cdot \zeta_{\text{роз}} + \zeta_{\text{в}}) \right]; 0 \leq t \leq t_{III}, \quad (8.59)$$

де L_{n1} , L_{n2} – довжини ділянок робочої поверхні пуансона, уздовж яких переміщується вологий дисперсний матеріал; $L_{\text{в}}$ – довжина виступу пуансона; $D_{\text{в.з1}}$, $D_{\text{в.з2}}(t)$ – гідравлічні діаметри потоку матеріалу у прес-формі на ділянках довжинами L_{n1} , L_{n2} [205]; $\lambda_{\text{вІ}}$, $\lambda_{\text{вІІ}}(t)$ – коефіцієнти гідравлічного тертя у середовищі матеріалу на ділянках довжинами L_{n1} , L_{n2} [205]; $\zeta_{\text{вх}}$, ζ_p , ζ_n , $\zeta_{\text{зв}}$, $\zeta_{\text{роз}}$, $\zeta_{\text{в}}$ – коефіцієнти місцевих опорів [205, 198] на вході у прес-форму у перерізі I – I, на розгалуженні 6, на повороті 7, на поступовому звуженні 8 виступів 5 (з кожної сторони робочої поверхні пуансона виконані по чотири такі виступи, див. також рисунок 8.6), на раптовому розширенні 9 за виступом 5 (по чотири раптові розширення з кожної сторони), на виході з прес-форми. Нижче наведені формули для визначення складових у рівнянні (8.59) [5, 205]

$$\lambda_{\text{вІ}} = 0,11 \left(\frac{68}{\text{Re}_{\text{вІ}}} + \frac{\Delta_n}{D_{\text{в.з1}}} \right); \lambda_{\text{вІІ}}(t) = 0,11 \left(\frac{68}{\text{Re}_{\text{вІІ}}(t)} + \frac{\Delta_n}{D_{\text{в.з2}}(t)} \right);$$

$$D_{\text{в.з1}} = \frac{4 \cdot A_{o,n} B_{\text{в}}}{2 \cdot A_{o,n} + 2 \cdot B_{\text{в}}}; D_{\text{в.з2}}(t) = \frac{4 \cdot B_{\text{в}} [H_{\text{в}} - (z_I + z_{II}) \cos \gamma]}{2 B_{\text{в}} + 2 \cdot [H_{\text{в}} - (z_I + z_{II}) \cos \gamma]}; \quad (8.60)$$

$$\text{Re}_{\text{вІ}} = \frac{v_{\text{вІ-І}} \cdot D_{\text{в.з1}}}{v_{\text{в}}}; \text{Re}_{\text{вІІ}}(t) = \frac{v_{\text{вІІ-ІІ}}(t) \cdot D_{\text{в.з2}}(t)}{v_{\text{в}}}; 0 \leq t \leq t_{III},$$

де $\text{Re}_{\text{вІ}}$, $\text{Re}_{\text{вІІ}}(t)$ – числа Рейнольдса матеріалу на ділянках довжинами L_{n1} , L_{n2} ; $v_{\text{в}}$ – кінематична в'язкість матеріалу [5, 205]; Δ_n – середня висота мікронерівностей на внутрішніх поверхнях прес-форми та пуансона.

З використанням рівняння (8.55) після підстановки до нього рівнянь (8.56 – 8.60) можна знайти тиск $p_{el-l}(t)$ у будь-який момент часу циклу вібронавантаження. Знаючи $p_{el-l}(t)$, за аналогом з рівнянням (8.55), можна скласти рівняння для визначення тиску й у проміжних перерізах прес-форми, після кожного місцевого опору. Дані тиски додаються до тисків, розрахованих за формулами (8.47 – 8.49), (8.51 – 8.54), таким чином розраховується сумарний тиск у середовищі вологого дисперсного матеріалу на кожній характерній ділянці прес форми, від якого залежить продуктивність віброударного зневоднення.

Метою розробки наступної схеми було підвищення енергетичної ефективності процесів та обладнання для зневоднення вологих дисперсних матеріалів, що забезпечує при порівняно невеликих габаритах інтенсифікацію розглядуваних процесів. Також потрібно отримати залежності для визначення зміни тиску в середовищі оброблюваного вологого дисперсного матеріалу при поетапному видаленні з них вільної, капілярно-пов'язаної і адсорбційно-зв'язаної рідини, а також для розрахунку тривалості кожного етапу та об'єму видаленої при його здійсненні рідини, що дозволить оптимізувати енерговитрати і продуктивність обладнання.

На рисунку 8.9 представлена розроблена автором схема високоефективної установки для тристадійного віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів [245].

Працює установка в такий спосіб. Вологий дисперсний матеріал з початковою вологістю $U_n = 95 - 97\%$ періодично подається в бак 3, встановлений на рухомий траверсі 2. Вмикається допоміжний гідропривід гідроциліндрів 8, 9 (на схемі не показаний) і робоча рідина під тиском подається в штокову порожнину гідроциліндра 8 (поршнева порожнина останнього з'єднується зі зливом). Поршень зі штоком гідроциліндра 8 і разом з ними кронштейн 7 з заслінкою 6 зміщуються вправо за схемою, відкриваючи доступ матеріалу через отвір пуансона 10 в прес-форму 11 (див. також розріз Б-Б на рисунку 8.9). Прес-форма заповнюється матеріалом, після чого за допомогою допоміжного гідроприводу і гідроциліндра 8 заслінка 6 зсувається вліво до упору, перекриваючи отвір в пуансоні 10. Вмикається ГП (на схемі не показаний), що забезпечує періодичну зміну тиску робочої рідини в порожнині гідроциліндра 19 кільцеподібного поперечного перерізу (див. також розріз Г-Г на рисунку 8.9) від $p_2 = 4$ МПа до $p_1 = 11$ МПа. В результаті плунжер 18 гідроциліндра і разом з ним вибростол 17, прес-форма 11 з заслінкою 15 і порцією матеріалу 16, пуансон 10 з заслінкою 6 і траверса 2 з баком 3 і матеріалом в ньому здійснюють вертикальні зворотно-поступальні переміщення з частотою до 60 Гц і амплітудою до 2,5 мм. Повернення вищезазначених рухомих елементів установки в вихідне нижнє положення на етапах зменшення тиску робочої рідини в порожнині гідроциліндра 19 від p_1 до p_2

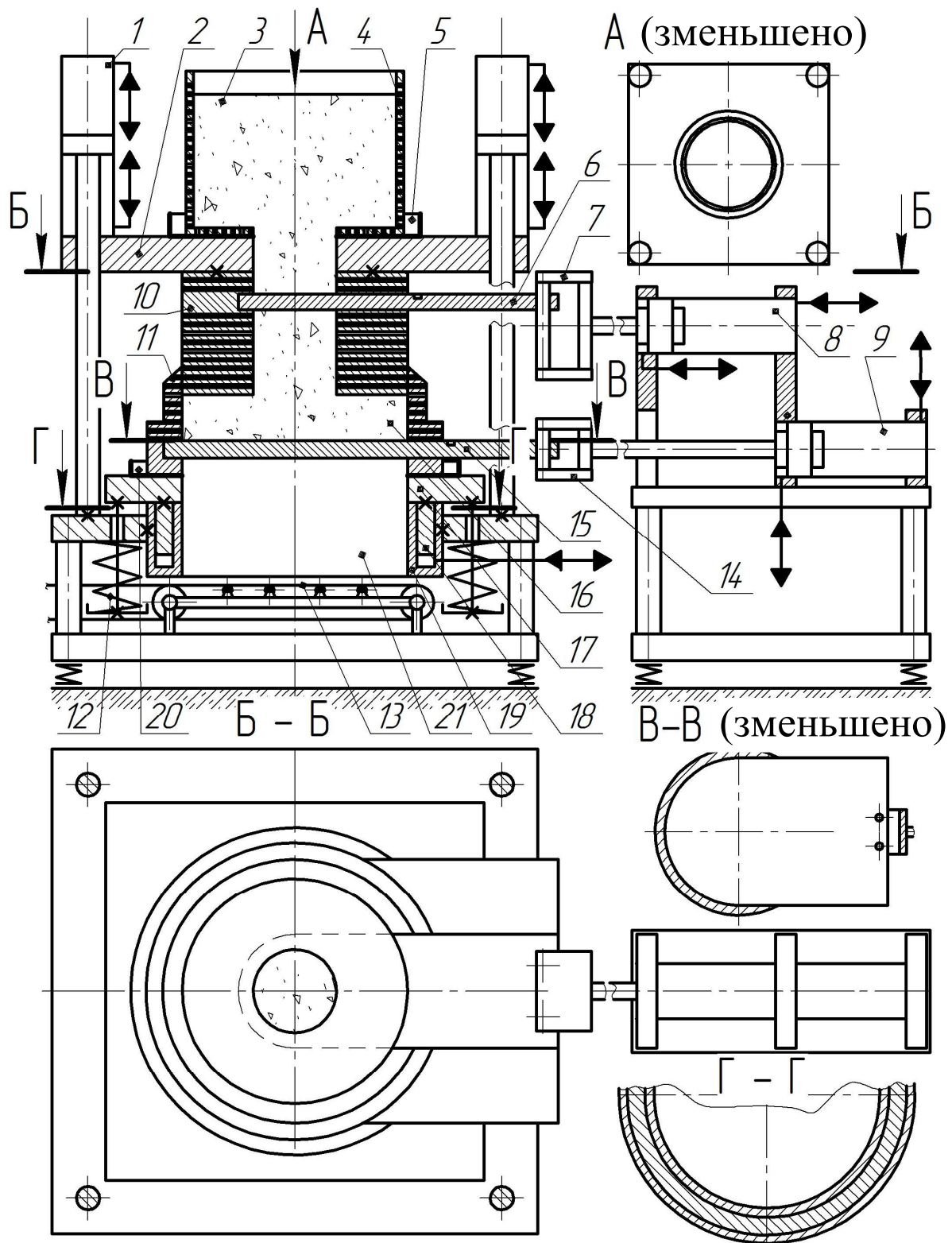


Рисунок 8.9 – Схема високоєфективної установки для тристадійного віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів

здійснюється під дією сили тяжіння і стиснених пружин 12. Вібростіл 17 в кінці кожного етапу повернення вдарається об торець корпусу гідроциліндра 19 і дані ударні імпульси передаються іншим рухомих елементами. При цьому матеріал у баку 3 і в прес-формі 11 піддається

віброударному інерційному навантаженню, реалізується стадія його попереднього віброударної зневоднення. Видалена з матеріалу рідка фаза виходить через дрібні отвори 4 в стінках і днищі бака 3, а також в стінках пуансона 10 і прес-форми 11 (з середини отвори закриті металевою фільтрувальною сіткою, що затримує тверді частинки матеріалу). Видалена рідка фаза збирається в баках 5 і 20, з яких по гнучким трубопроводах (на схемі не показані) відводиться в каналізацію. Рухливість заслінок 6, 15 у вертикальній площині відносно кронштейнів 7, 14 забезпечується за рахунок їх штифтового з'єднання (див. також розріз В-В на рисунку 8.9). Відповідно до результатів проведених автором на стенді-прототипі установки експериментів [242] з віброударного зневоднення спиртової барди, кавового шламу та бурякового жому з $U_n = 95\%$, їх кінцева вологість після завершення описаної вище стадії попереднього зневоднення тривалістю 13 - 15 с, становила $U_{к1} = 85 - 87\%$ [242].

На другій стадії зневоднення матеріалу на установці (див. рисунок 8.9) ГП вимкнений, таким чином плунжер 18, вібростіл 15, прес-форма 11 з заслінкою 15 і порцією матеріалу 16 знаходяться в нижньому положенні. Вмикається допоміжний гідропривід чотирьох гідроциліндрів 1 (див. вид А на рисунку 8.9), робоча рідина під тиском надходить у їх штокові порожнини, в той час як поршневі порожнини гідроциліндрів з'єднані зі зливом. В результаті траверса 2, пов'язана з корпусами гідроциліндрів 1 і разом з нею бак 3, і пуансон 10 з заслінкою 6 опускаються вниз, здійснюється статичне пресування порції матеріалу 16. Оптимальна тривалість даної стадії зневоднення за даними автора, отриманим на стенді-прототипі [242] становить 10 с, після чого вологість зазначених вище трьох видів матеріалу становить $U_{к2} = 76 - 78\%$ [242].

Далі на третій стадії віброударного зневоднення при працюючому допоміжному приводі, що забезпечує статичне пресування порції 16, знову вмикається ГП. Плунжер 17 і пов'язані з ним рухомі елементи, в тому числі прес-форма 11 з порцією 16, здійснюють вертикальні зворотно-поступальні переміщення. Порція 16 піддається найбільш інтенсивному комбінованому статичному і віброударному інерційному навантаженню протягом 28 - 30 с [242], в результаті кінцева вологість трьох видів вологих дисперсних матеріалів складе $U_{к3} = 22 - 25\%$ [2]. Після цього ГП і допоміжний гідропривід, що забезпечує статичне притискання пуансона 10 до порції 16 вмикаються. Запускається допоміжний гідропривід гідроциліндрів 8, 9. Робоча рідина подається в штокову порожнину гідроциліндра 9 (поршнева порожнина сполучається зі зливом), в результаті поршень гідроциліндра і разом з ним заслінка 15 зміщуються вправо, відкриваючи отвір 21. Вмикається гідропривід гідроциліндрів 1, забезпечуючи опускання пуансона 10 з заслінкою 6 і траверси 2 з баком 3. При цьому пуансон 10 витискає зневоднену порцію 16 з прес-форми 11 через отвір 21 на стрічковий конвеєр 13, що транспортує її в накопичувач

(на схемі не показаний). Далі за допомогою допоміжного гідроприводу заслінка 15 зміщується до упору вліво, перекриваючи отвір 21. Відкривається заслінка 6 і наступна порція вологого дисперсного матеріалу надходить з бака 3 в прес-форму 11. Заслінка 6 закривається, після чого весь описаний вище цикл тристадійного віброударного зневоднення повторюється.

Перевагою даної схеми, в порівнянні, наприклад, з установкою, запропонованою в роботі [242], є зменшення частки допоміжного часу в загальному робочому циклі установки, скорочення кількості одиниць обладнання в технологічному комплексі при збереженні його незмінної продуктивності, а також здійснення попереднього віброударного зневоднення матеріалу в той час, коли він ще знаходиться в накопичувальному баку 3 (див. рисунок 8.9). Все це забезпечує підвищення ефективності установки. У той же час, на ній, як і на установці, виконаною за попередньою схемою [242] реалізується тріхстадійне віброударне зневоднення відходів в прес-формі закритого типу з послідовним збільшенням від стадії до стадії інтенсивності навантаження, що дозволяє досягти їх мінімальної кінцевої вологості.

В роботі [246] вказується, що скелет (основа) капілярно-пористих колоїдних тіл, до яких відносяться вологі дисперсні відходи харчових виробництв, утворений окремими волокнами, складний за своєю структурою і має велику розвинену поверхню. Пори і капіляри, утворені в листі з волокон, мають найрізноманітнішу форму і розміри, можуть бути наскрізними (без дна) і нескрізними, сполученими безпосередньо і за допомогою розгалуженої системи пір з навколишнім середовищем. Крім того, самі волокна, радіус капілярів в яких є різним, відрізняються великою пористістю. Змоделювати точно таку складну структуру не представляється можливим, тому автори, що займаються подібними задачами [43, 51, 54, 246, 247] вводять ряд припущень і спрощень. Відомо також [43, 246], що рідка фаза колоїдних капілярно-пористих тіл, в залежності від величини енергії її зв'язку з твердими частинками основи, умовно поділяється на хімічно-пов'язану, адсорбційно-зв'язану (фізико-хімічний зв'язок), капілярно-зв'язану (фізико-механічний зв'язок) і вільну. На нашу думку, цілком припустимою є структура капілярно-пористих тіл, в тому числі відходів харчових виробництв, схематично представлена на рисунку 8.10. На даній схемі тверда фаза відходів утворює трубчастий каркас, при цьому їх вільна рідина знаходиться в порожнинах квадратного поперечного перерізу розміром l , капілярно-зв'язана - в каналах діаметром d , а адсорбційно-зв'язана і хімічно зв'язана - в порах стінок каналів товщиною δ .

В роботі [5] обґрунтовано, що в процесі віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів в прес-формі протягом кожного циклу навантаження при проходженні в об'ємі порції осьових і радіальних хвиль

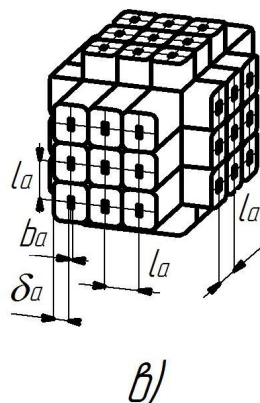
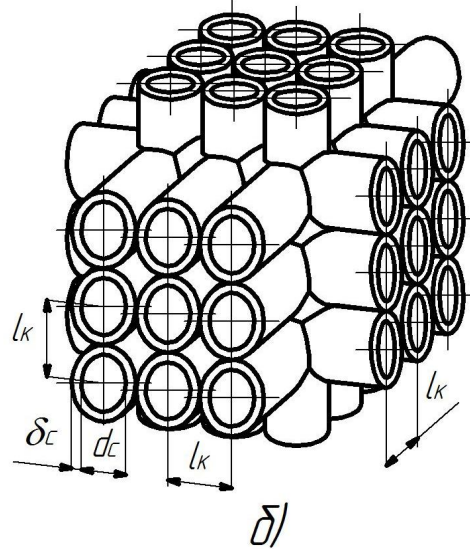
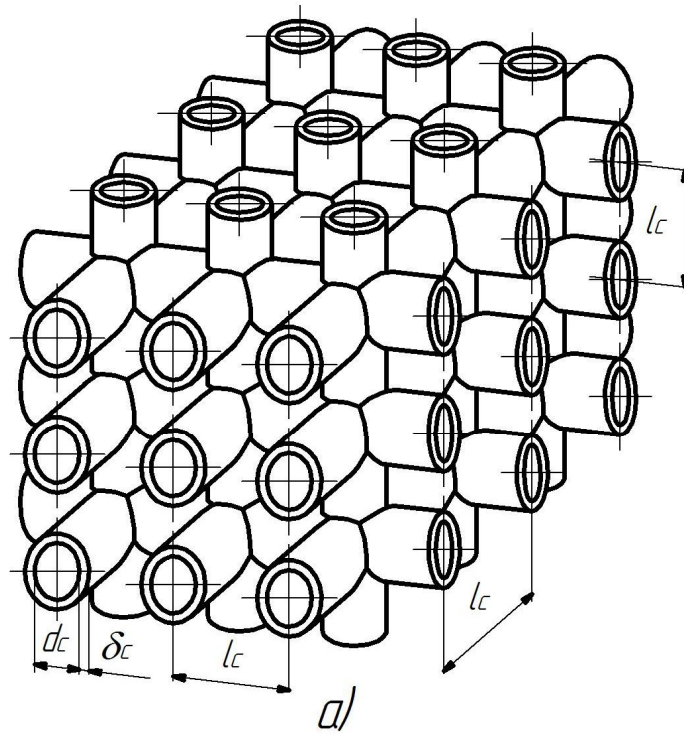


Рисунок 8.10 – Схеми структури твердої фази волого дисперсного матеріалу (відходів харчових виробництв) на етапах видалення з них вільної (а), капілярно-зв'язаної (б) та адсорбційно-зв'язаної рідини

напружень і деформацій, а також видаленні частини рідкої фази, забезпечується рівномірний перерозподіл твердих частинок за об'ємом з все більш повним їх укладанням. Таким чином, з високим ступенем ймовірності, можна вважати, що вид структури твердої фази в ході зневоднення не змінюється, вона стає лише більш щільною [5]. При цьому першою під дією порівняно невеликих тисків видаляється вільна рідина з порожнин квадратного поперечного перерізу. Одночасно канали діаметром d_c з верхніх шарів при стисканні порції переміщуються в проміжки між каналами нижніх шарів і рівномірно розподіляються в них (рисунок 8.10, а, б). В результаті відстані між каналами зменшуються від l_c (рисунок 8.10, а) в початковий момент циклу до l_k (рисунок 8.10, б). Далі при більш високому тиску починає віддалятися капілярно-зв'язана рідина, відбувається розрив каналів, збільшення кількості останніх в одиниці об'єму порції, зміна їх форми і розмірів (рисунок 8.10, б, в). Одночасно також витікає решта вільної рідини з порожнин між каналами. На третьому етапі навантаження ще більше зростає, таким чином, видаляється частина адсорбційно-зв'язаної рідкої фази з пір стінок каналів товщиною δ_c при їх стисненні (рисунок 8.10, в) і практично вся вільна рідина.

Середні значення l_c , d_c і δ_c для виділеного об'єму оброблюваного матеріалу можна визначити методами мікроструктурного аналізу. Значення l_k , відповідно до рисунку 8.10, б розраховуємо як $l_k = d_c + 2 \cdot \delta_c$, розмір b_a приймаємо $b_a = 0,1 \cdot d_c$, а $l_a \approx 2 \cdot \delta_c$ (див. рисунок 8.10, в). Необхідний для видалення вільної рідини тиск в середовищі матеріалу в середній по висоті точці прес-форми, на її осі, де цей тиск, що створюється сумарним зусиллям $F_{mz\Sigma}(t)$ [5] на пуансоні і днище прес-форми є мінімальним, визначаємо за формулою

$$p_{c.\min} = \frac{F_{mz\Sigma\min}}{S_m} + \Delta p_{m\Sigma\delta} + \Delta p_{m\Sigma z} + \Delta p_{cm}, \quad (8.61)$$

де $F_{mz\Sigma\min}$ - мінімальне протягом циклу віброударного навантаження значення $F_{mz\Sigma}(t)$ [5] в момент часу, що безпосередньо передуює удару вібростолу 17 (див. рисунок 8.9) об торець корпусу гідроциліндра 19 при його поверненні в початкове нижнє положення; S_m - площа поперечного перерізу порції відходів; $\Delta p_{m\Sigma\delta}$, $\Delta p_{m\Sigma z}$, Δp_{cm} - відповідні $F_{mz\Sigma\min}$ місцеві втрати тиску [204] в середовищі матеріалу між днищем прес-форми і розглянутою середньою точкою у вертикальній ($\Delta p_{m\Sigma\delta}$) і горизонтальній ($\Delta p_{m\Sigma z}$) площинах, а також втрати тиску при витіканні рідини через стінки прес-форми (Δp_{cm}), що розраховуються за залежностями

$$\Delta p_{m\Sigma\delta} = \zeta_m \rho_p \frac{v_p^2}{2} \frac{H_m}{2 \cdot l_c}; \quad (8.62)$$

$$\Delta p_{m\Sigma\beta} = \zeta_m \rho_p \frac{\mathcal{X}_p^2}{2} \frac{1}{l_c} \sqrt{\frac{S_m}{\pi}}; \Delta p_{cm} = \zeta_{cm} \rho_p \frac{\mathcal{X}_p^2}{2},$$

де ζ_m, ζ_{cm} - коефіцієнти місцевих опорів [205] при проходженні рідиною осередків структури твердої фази відходів (див. рисунок 8.10), а також отворів в стінці пуансона 10 (див. рисунок 8.9); ρ_p - густина рідкої фази відходів в момент часу $F_{m\Sigma}(t) = F_{m\Sigma\min}(t)$ [5]; $\mathcal{X}_p, \mathcal{X}_p$ - відповідні швидкості переміщення рідкої фази відносно вертикальної осі z і горизонтальній осі y [5]; H_m - вихідна висота порції матеріалу.

У зв'язку з тим, що в міру відокремлення рідини з прес-форми розміри порожнин в структурі твердої фази зменшуються від l_c до l_k (див. рисунок 8.10, а, б) і зростають втрати $\Delta p_{m\Sigma\beta}, \Delta p_{m\Sigma\gamma}$ для запобігання падінню продуктивності зневоднення необхідно забезпечити відповідне збільшення p_c від $p_{c.\min}$ до мінімального капілярного тиску $p_{k.\min}$ [246]

$$p_{k.\min} = \frac{4 \cdot \sigma_p}{d_c}, \quad (8.63)$$

де σ_p - поверхневий натяг між газовою і рідкою фазами відходів [246].

Значення p_c залежить в першу чергу від максимального тиску p_1 в гідросистемі ГПП [5] установки (див. рисунок 8.9), яке можна безступінчасто і з високою точністю змінювати по ходу реалізації робочого процесу зневоднення. Тоді умова для визначення p_c на першому етапі віброударного зневоднення, при видаленні з порції відходів основної частини вільної рідини можна записати як

$$p_{c.\min} \leq p_c \leq p_{k.\min}. \quad (8.64)$$

За знайденим значенням p_c за допомогою формул [5] можна розрахувати відповідні необхідні підвищення p_1 .

Умова, за якою визначається тривалість t_{el} першого етапу має вигляд

$$\Sigma W_{ol} \geq \left[(l_c - d_c)^2 d_c + (l_c - d_c) d_c^2 \right] \frac{S_m H_m}{l_c^3}, \quad (8.65)$$

де ΣW_{ol} - сумарний об'єм рідкої фази, яка витікає з прес-форми на даному етапі [5]. Даний об'єм для першого, другого і третього етапів зневоднення розраховуємо як

$$\Sigma W_{oI,II,III} = \sum_{i=1}^{k_1} W_{o,i} + \sum_{i=k_1+1}^{k_2} W_{o,i} + \dots + \sum_{i=k_{n-1}}^{k_n} W_{o,i}, \quad (8.66)$$

де $W_{o,i}$ – об'єм рідини, що видаляється протягом i -го циклу зневоднення [5]; k_1, k_2, \dots, k_n - число циклів віброударного навантаження тривалістю $T_{y1}, T_{y2}, \dots, T_{yn}$, реалізованих при відповідних зростаючих значеннях $p_1: p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1n}$; n - число стадій зміни p_1 .

Тривалість першого, другого і третього етапів знаходимо як

$$t_{oI,II,III} = \sum_{i=1}^n T_{y,i} k_i. \quad (8.67)$$

Умова для визначення p_k на другому етапі зневоднення, при видаленні капілярно-зв'язаної рідини може бути представлено як

$$p_{k.min} \leq p_k \leq p_{k.max} = 4 \cdot \sigma_p / d_a. \quad (8.68)$$

Відповідні необхідні значення $F_{mz\Sigma}$, за якими згодом за формулами [5] розраховуються $p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1n}$ для другого етапу визначаємо таким чином

$$F_{mz\Sigma} = p_k S_m. \quad (8.69)$$

На даному другому етапі зневоднення необхідно видалити об'єм рідини (див. рисунок 2, б, в)

$$\Sigma W_{oII} \geq \left[\frac{5}{6} l_k^3 + \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} (d_c + 6 \cdot \delta_c) \right] \frac{H_m S_m - \Sigma W_{oI}}{l_k^3}. \quad (8.70)$$

Для розподілу ΣW_{oII} по циклам віброударного навантаження і знаходження відповідної тривалості t_{eII} другого етапу використовуємо формули (8.66, 8.67).

В роботі [246] наводиться формула для розрахунку енергії зв'язку адсорбційно-зв'язаної води

$$A = R \cdot T \cdot \ln 4, \quad (8.71)$$

в якій R - універсальна газова постійна; T - абсолютна температура води.

В роботі [5] містяться рівняння балансів енергії для вібропреса з ГПІ при зневодненні на ньому вологих дисперсних матеріалів, за допомогою яких, в залежності від конструктивних і робочих параметрів вібропреса

можна визначити енергію $E_{o.nl}$, що витрачається на зневоднення. Прирівнявши $E_{o.nl}$ до A , обчислену за формулою (8.71), отримаємо залежність для розрахунку мінімально необхідного тиску $p_{a.min}$ в середовищі матеріалу для видалення з нього адсорбційно-зв'язаної рідини.

Відповідно до даних проведених нами експериментальних досліджень [5, 242], кінцева вологість $U_{кз}$ трьох зазначених вище видів вологих дисперсних матеріалів становить не менше 20 - 25%. В основному це хімічно-зв'язана рідина, видалити яку з використанням тільки механічних способів зневоднення не представляється можливим [246]. Крім того, в структурі оброблюваної порції залишається незначна кількість адсорбційно-зв'язаної, капілярно-зв'язаної і навіть вільної рідкої фази (див. рисунок 2, в), видалення якої вимагає значних енерговитрат, а тому недоцільно.

З урахуванням вищевикладеного, об'єм ΣW_{oIII} рідини, що видалається на третьому етапі можна знайти з умови

$$\Sigma W_{oIII} \geq \frac{\rho_m H_m S_m (U_n - U_{кз})}{\rho_p 100} - (\Sigma W_{oI} + \Sigma W_{oII}), \quad (8.72)$$

де ρ_m - початкова густина оброблюваного матеріалу.

Далі з використанням формул (8.66, 8.67) розраховуємо параметри навантаження на третьому етапі зневоднення і його тривалість t_{eIII} .

За допомогою наведених вище формул процеси віброударного зневоднення можуть бути істотно раціоналізовані, із забезпеченням їх більш високої економічної ефективності.

Як показали проведені автором дослідження та розрахунки для ефективного зневоднення відходів харчових виробництв на вітчизняних підприємствах харчової промисловості установка має забезпечувати кінцеву вологість вологих дисперсних відходів не вище 20 - 25%, при продуктивності 30 - 60 т зневоднених відходів на добу і середньої енергоємності робочих процесів 90 кВт год / т.

Для досягнення даних параметрів віброударного зневоднення автором раніше пропонувалося ділити його на декілька стадій, кожна з яких здійснювати на окремої одиниці обладнання [175]. Останнє обумовлює істотне збільшення капітальних витрат на утилізацію відходів і негативно позначається на загальній ефективності пропонованого способу.

Тому була розроблена схема установки з ГП для тристадійного віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів з досягненням зазначених вище параметрів економічної ефективності, зі збільшенням від стадії до стадії інтенсивності навантаження матеріалу. Останнє, відповідно до результатів проведених нами експериментів і теоретичних обґрунтувань, дозволить максимально підвищити ефективність робочих процесів [5] і досягти зазначених вище показників. Крім того,

використовувався досвід розробки схем обладнання аналогічного призначення, основні конструктивні рішення якого були перевірені практично за допомогою експериментального стенду-прототипу, створеного на базі інерційного вгбропрес-молота з ГП моделі ІВПМ-16 [64].

Для визначення основних параметрів ефективності установки (продуктивності, енергоємності та забезпечуваної кінцевої вологості оброблюваного матеріалу) використовувалися формули і підходи, сформульовані автором в роботі [5], а також відомі універсальні методики з розрахунку економічної ефективності промислового обладнання [248].

На рисунку 8.11 представлена розроблена нами схема установки з ГП для тристадійного віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів [242]. Установка включає станину, яка складається з верхньої 3, середньої 16 і нижньої 18 поперин, з'єднаних колонами 4, 11. Станина базується на віброопорах 19. На верхній поперечині 3 станини змонтовані два баки 1, в які зверху або збоку по трубах (на схемі не показані) з основного виробництва періодично подається матеріал, що зневоднюється. Баки 1 через отвори у верхній поперечині 3, два гнучкі гофровані гумовотканинні рукави 12 і отвори в рухомий траверсі 14 і в пуансоні 6 пов'язані з прес-формою 7, закріпленої на вібростолі 8. Отвори в рухомий траверсі 14 перекриваються заслінками 13, взаємодіючими через кронштейни зі штоками двох гідроциліндрів 5, встановленими на верхній поверхні траверси. На цій же поверхні закріплені інерційні маси 26. На поперечині 3 змонтований допоміжний гідроциліндр 2, шток якого пов'язаний з рухомою траверсою 14. Вібростіл 8 з'єднується з плунжером гідроциліндра 17 ГП і підпружинений відносно поперечини 16 пружинами 10. По периметру вібростола 8 приварений жолоб 9, від якого гнучкі трубки 21 відходять до баків 20, встановлених на поперечині 18. У бокових стінках і днищі прес-форми 7, а також в бокових стінках пуансона 6 виконана велика кількість дрібних отворів 27, закритих зсередини металевою фільтрувальною сіткою 28. Збоку від установки на окремій станині 25, оснащеної віброопорами, змонтований гідроциліндр 24, до штоку якого прикріплений блок гідрантів 23 і гумовометалевий скребок 22. На одній з колон 11 зафіксований гідроциліндр 31, зі штоком якого пов'язаний лоток 29. Під лотком 29 розташовується стрічковий конвеєр 30.

Працює установка в такий спосіб. Вологий дисперсний матеріал з початковою вологістю $U_n = 95 - 97\%$ накопичуються в баках 1. На початку робочого циклу установки її ГП (на схемі не показаний) вимкнений і плунжер гідроциліндра 17, вібростіл 8 і прес-форма 7 знаходяться в початковому нижньому положенні (вібростіл притискається пружинами 10 до бурту корпусу гідроциліндра 17). Штоки гідроциліндрів 5 повністю висунуті, внаслідок чого, пов'язані з ними заслінки 13 перекривають отвори в траверсі 14.

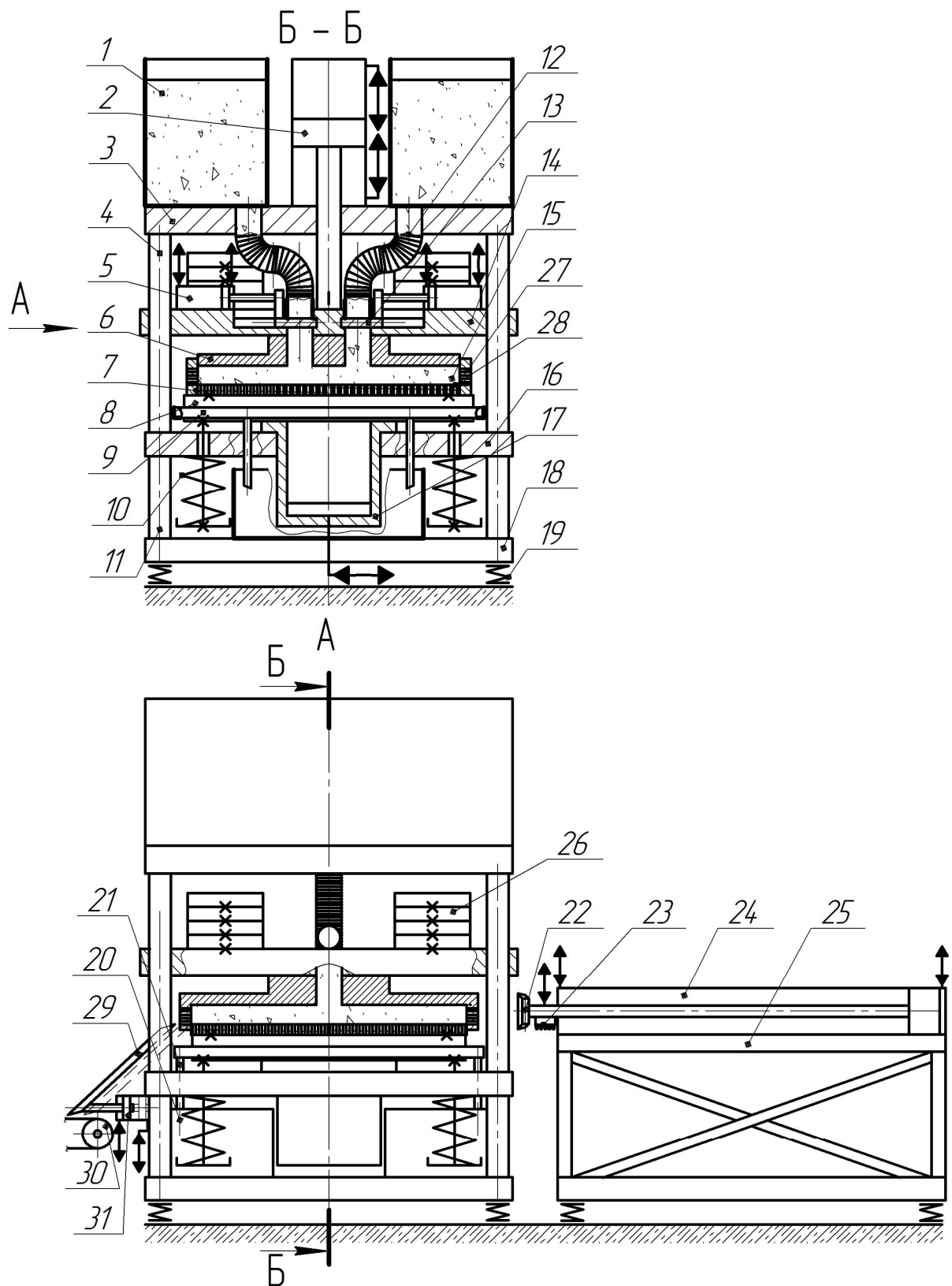


Рисунок 8.11 - Схема установки з ГП для трьохстадійного віброударної зневоднення відходів харчових виробництв

За допомогою допоміжного гідроприводу (на схемі не показаний) траверса 14 з інерційними масами 26 і пуансоном 6 встановлюються в

положенні, показаному на схемі, при цьому пуансон 6 перекриває верхній переріз прес-форми 7. Далі поршні гідроциліндрів 5 з заслінками 13 розходяться в протилежні сторони до упору в бурти траверси 14, в результаті матеріал з баків 1 по рукавах 12 і через отвори в траверсі 14 і в пуансоні 6 надходить самопливом в прес-форму 7, заповнюючи її доверху. При цьому повітря з прес-форми витісняється через сітку 28 і отвори 27. Далі штоки гідроциліндрів 5 знову повністю висувуються і заслінки 13 перекривають отвори в траверсі 14.

Вмикається ГП, що забезпечує періодичну зміну тиску робочої рідини в порожнині гідроциліндра 17 від $p_2 = 4$ МПа до $p_1 = 12$ МПа. В результаті на етапах збільшення тиску плунжер гідроциліндра 17 і разом з ним вібростіл 8 з прес-формою 7 і порцією матеріалу 15 зміщуються вгору, при цьому стискаються пружини 10, а на етапах падіння тиску вібростіл з прес-формою і матеріалом під дією власної сили тяжіння і стиснених пружин 10 опускаються в початкове положення з ударом вібростолу в кінці холостого ходу об борт корпусу гідроциліндра 17. Таким чином, зазначені елементи здійснюють вертикальні зворотно-поступальні переміщення з частотою до 60 Гц і амплітудою 0,5 - 1 мм. Порція матеріалу 15 в прес-формі 7 на даній першій стадії технологічного процесу зневоднення піддається попередньому віброударному навантаженню із забезпеченням періодичного підпресовувального впливу з боку пуансона 6, в кінці кожного робочого ходу вібростолу 8. При цьому витиснена з порції матеріалу 15 рідка фаза відходів витікає через осередки сітки 28 і отвори 27 в жолоб 9, а далі по трубках 21 йде в баки 20, звідки направляється на очищення та повертається на виробництво [5] або зливається в каналізацію.

За допомогою стенду-прототипу даної установки, створеного на базі вібропреса ІВПМ-16 [64] автором було проведено експерименти з попереднього віброударного зневоднення відповідно до описаної вище послідовністю спиртової барди, бурякового жому та кавового шламу з $U_n = 95\%$. Мінімальна кінцева вологість зазначених матеріалів після 13 - 15 с попереднього зневоднення становила $U_{kl} = 85 - 87\%$.

По завершенню першої стадії віброударного зневоднення матеріалу на пропонованій установці (див. рисунок 8.11) ГП відключається. Запускається допоміжний гідропривід гідроциліндра 2, що забезпечує опускання поршня останнього, а також траверси 14 з інерційними масами 26 і пуансоном 6. При цьому порція матеріалу 15 в прес-формі 7 стискається зусиллям, створюваному на пуансоні 6 тиском робочої рідини в поршневій порожнині гідроциліндра 2 і вагою інерційних мас 26. Реалізується друга стадія технологічного процесу зневоднення матеріалу - стадія статичного пресування тривалістю до 10 с. Після здійснення даної стадії на стенді-прототипі установки (див. вище) кінцева вологість

спиртової барди, бурякового жому та кавового шламу становила близько $U_{к2} = 76 - 78\%$.

На третій стадії зневоднення матеріалу при увімкненому допоміжному гідроприводі установки (див. рисунок 8.11), що забезпечує статичне притискання пуансона 6 до порції матеріалу 15, знову запускається ГПП. При вертикальних зворотно-поступальних переміщеннях плунжера гідроциліндра 17, вібростолу 8, прес-форми 7 з матеріалом 15, пуансона 6, траверси 14 з масами 26, штока і поршня допоміжного гідроциліндра 2 з частотою до 60 Гц і амплітудою до 2,5 мм реалізується найбільш інтенсивний режим віброударного навантаження матеріалу тривалістю 28 - 30 с.

Мінімальна кінцева вологість порцій трьох зазначених вище видів вологих дисперсних матеріалів після здійснення їх остаточного зневоднення на стенді-прототипі (третій стадії), згідно з отриманими авторами результатами, не перевищувала $U_{к3} = 22 - 25\%$, що відповідає поставленій задачі.

Після завершення описаного процесу зневоднення порції матеріалу в прес-формі закритого типу на установці (див. рисунок 8.11) ГПП останньої вимикається. Рухома траверса 14 з пуансоном 6 і масами 26 піднімаються вгору до точки, в якій нижній переріз пуансона 6 (див. вид А на рисунку 8.11) буде перебувати на одному рівні з верхнім перерізом прес-форми 7 (див. розріз Б - Б на рисунку 8.11). За допомогою гідроциліндра 31 до кромки днища прес-форми 7 до упору в неї підводиться лоток 29. Вмикається гідропривід гідроциліндра 24, шток якого повністю висувається, при цьому разом зі ним скребок переміщається 22, який зрізає порцію 15 зневодненого матеріалу з поверхні прес-форми 7 і скидає її на лоток 29. По лотку порція зісковзує на стрічковий конвеєр, що подає зневоднений матеріал в бункер-накопичувач (на схемі не показаний). При зворотному переміщенні штока гідроциліндра 24 через пов'язаний з ним блок гідрантів 23 під великим напором подається вода, якою промивають фільтрувальну сітку 27, закріплену на днище прес-форми 7 і отвори в ньому від налиплих твердих частинок вологого дисперсного матеріалу. Одночасно з цим траверса 14 з інерційними масами 26 і пуансоном 6 опускається в початкове, показане на схемі положення. З використанням гідроциліндрів 5 відкриваються заслінки 13 і наступна порція матеріалу з баків 1 заповнює прес-форму 7, після чого весь описаний вище цикл тристадійного віброударного зневоднення повторюється.

Для підвищення ефективності експлуатації пропонованого обладнання доцільно одночасно використовувати на одному і тому ж самому підприємстві не менше двох таких установок. У цьому випадку вони можуть мати тільки один загальний ГПП, підключений через чотирилінійний двохпозиційний гідророзподільник з електромагнітним керуванням [204] до порожнин гідроциліндрів 17 установок. Тоді при

з'єднанні через гідророзподільник зі зливом гідроциліндра 17 першої установки на ній може бути реалізований етап очищення, промивання і заповнення відходами прес-форми 7. Одночасно на другий установці, гідроциліндр 17 якої підключений через гідророзподільник до ГП, здійснюється зневоднення в прес-формі 7 порції відходів. По завершенню останнього гідророзподільник перемикається в іншу позицію, забезпечуючи приєднання ГП до першої установки і зневоднення на ній порції відходів, тоді як на другий установці, внаслідок з'єднання зі зливом її гідроциліндра 17 йде очищення, промивання і повторне заповнення прес-форми 7. Для управління комплексом може використовуватися електроавтоматика і комп'ютер.

Продуктивність за матеріалом, що зневоднюється для такого технологічного комплексу, що включає дві аналогічні установки (див. рисунок 8.11) з одним ГП можна визначити за формулою

$$P_3 = \frac{S_{n.ф} H_M \rho_M}{t_1 + t_2 + t_3} t_{3м} n_{3м}, \quad (8.73)$$

де $S_{n.ф}$ - площа днища прес-форми; H_M - початкова товщина шару матеріалу в прес-формі; ρ_M - початкова густина матеріалу; t_1, t_2, t_3 - тривалість першої, другої і третьої стадій зневоднення матеріалу; $t_{3м}$ - середня тривалість безперервної роботи установок протягом однієї робочої зміни; $n_{3м}$ - кількість робочих змін протягом доби.

Енергоємність зневоднення матеріалу на запропонованому комплексі

$$E_3 = \left[\begin{array}{l} N_{\partial 1}(2 \cdot t_{n1} + 2 \cdot t_{n2}) + \\ + N_{\partial 2}(2 \cdot t_2 + 2 \cdot t_3 + t_{n3} + t_{n9}) + \\ + 2 \cdot N_{ГП}(t_1 + t_3) + N_{\partial 3}(t_{n4} + t_{n6}) + \\ + N_{\partial 4}(t_{n5} + t_{n7}) + N_{\partial 5} t_{n8} \end{array} \right] \cdot 2 \cdot S_{n.ф} H_M \rho_M (U_n - U_{к3}), \quad (8.74)$$

де $t_{n1}, t_{n2}, t_{n3}, t_{n4}, t_{n5}, t_{n6}, t_{n7}, t_{n8}, t_{n9}$ - відповідно тривалість переміщення поршнів гідроциліндрів 5 установок комплексу (див. рисунок 8.11) для відкривання і закриття заслінок 13 перед, переміщення вверх поршня гідроциліндра 2 з траверсою 14 і пуансоном 6 після завершення зневоднення, переміщення поршня гідроциліндра 31 з лотком 29 для підведення останнього до прес-форми, переміщення вліво за схемою поршня гідроциліндра 24 зі скребком 22 для видалення збезводненої порції

матеріалу, переміщення поршня гідроциліндра 31 з лотком 29 вліво, переміщення поршня гідроциліндра 24 зі скребком 22 вправо у вихідне положення, тривалість роботи насоса подачі води через блок гідрантів 23 для промивання прес-форми 7, тривалість опускання поршня гідроциліндра 2 з траверсою 14 і пуансоном 6 в початкове положення; N_{61} , N_{62} , N_{63} , N_{64} , N_{65} - потужності насосних станцій допоміжних приводів, відповідно гідроциліндрів 5, 2, 31, 24, насоса блоку гідрантів 23; $N_{ГП}$ - потужність насосної станції ГП.

Коефіцієнти 2 в чисельнику формули (8.74) вказують на те, що у продовж одного циклу роботи комплексу в процесі реалізації на одній установці трьох стадій зневоднення порції матеріалу, на другий установці одночасно відбувається очищення і промивання прес-форми, а також заповнення її наступною порцією матеріалу. Таким чином, протягом одного робочого циклу комплексу на ньому здійснюється зневоднення двох порцій матеріалу, що враховує коефіцієнт 2 в знаменнику формули (8.74).

Потужності $N_{ГП}$, N_{62} розраховуємо за формулами [5, 64]

$$N_{ГП} = Q_{н.ГП} p_1 \frac{1 - p_2 / p_1}{\eta_{е.ГП} \eta_{н.ГП} \eta_{м.ГП}}; N_{\partial 2} = \frac{Q_{н.\partial 2} p_{\partial 2}}{\eta_{е.\partial 2} \cdot \eta_{н.\partial 2} \cdot \eta_{м.\partial 2}}, \quad (8.75)$$

де $Q_{н.ГП}$, $Q_{н.\partial 2}$ - номінальні подачі насосів станцій ГП і допоміжного гідроприводу; $\eta_{е.ГП}$, $\eta_{е.\partial 2}$, $\eta_{н.ГП}$, $\eta_{н.\partial 2}$, $\eta_{м.ГП}$, $\eta_{м.\partial 2}$ - ККД електродвигунів, насосів і муфт розглянутих приводів.

Потужності $N_{\partial 1}$, $N_{\partial 3}$, $N_{\partial 4}$, $N_{\partial 5}$ знаходимо по залежностями

$$N_{\partial 1} = \frac{Q_{н.\partial 1} p_{\partial 1}}{\eta_{е.\partial 1} \cdot \eta_{н.\partial 1} \cdot \eta_{м.\partial 1}} = \frac{(S_{ш5} t_{n1} + S_{ш5} t_{n2}) \cdot l_{x5} p_{\partial 1}}{\eta_{е.\partial 1} \cdot \eta_{н.\partial 1} \cdot \eta_{м.\partial 1}};$$

$$N_{\partial 3} = \frac{Q_{н.\partial 3} p_{\partial 3}}{\eta_{е.\partial 3} \cdot \eta_{н.\partial 3} \cdot \eta_{м.\partial 3}} = \frac{(S_{ш31} t_{n4} + S_{ш31} t_{n6}) \cdot l_{x31} p_{\partial 3}}{\eta_{е.\partial 3} \cdot \eta_{н.\partial 3} \cdot \eta_{м.\partial 3}};$$

$$N_{\partial 4} = \frac{Q_{н.\partial 4} p_{\partial 4}}{\eta_{е.\partial 4} \cdot \eta_{н.\partial 4} \cdot \eta_{м.\partial 4}} = \frac{(S_{ш24} t_{n5} + S_{ш24} t_{n7}) \cdot l_{x24} p_{\partial 4}}{\eta_{е.\partial 4} \cdot \eta_{н.\partial 4} \cdot \eta_{м.\partial 4}};$$

$$N_{\partial 5} = \frac{Q_{н.\partial 5} p_{\partial 5}}{\eta_{е.\partial 5} \cdot \eta_{н.\partial 5} \cdot \eta_{м.\partial 5}}, \quad (8.76)$$

де $Q_{н.\partial 1}$, $Q_{н.\partial 3}$, $Q_{н.\partial 4}$, $Q_{н.\partial 5}$ - номінальні подачі насосів розглянутих станцій; $p_{\partial 1}$, $p_{\partial 3}$, $p_{\partial 4}$, $p_{\partial 5}$ - номінальні тиску в нагнітальних гідролінії станцій, які визначаються виходячи з значень зусиль, які необхідно

створити на відповідних виконавчих елементах; $\eta_{e.\partial 1}, \eta_{e.\partial 3}, \eta_{e.\partial 4}, \eta_{e.\partial 5}, \eta_{н.\partial 1}, \eta_{н.\partial 3}, \eta_{н.\partial 4}, \eta_{н.\partial 5}, \eta_{м.\partial 1}, \eta_{м.\partial 3}, \eta_{м.\partial 4}, \eta_{м.\partial 5}$ - ККД електродвигунів, насосів і муфт розглянутих приводів; $S_{ш5}, S_{ш31}, S_{ш24}, S_{н5}, S_{н31}, S_{н24}$ - площі поршнів з боку штокової і поршневої порожнин гідроциліндрів 5, 31, 24; l_{x5}, l_{x31}, l_{x24} - хід поршнів гідроциліндрів 5, 31, 24.

При визначенні проміжків часу $t_{n1}, t_{n2}, t_{n3}, t_{n4}, t_{n5}, t_{n6}, t_{n7}, t_{n8}, t_{n9}$ слід забезпечити виконання умови

$$t_{n1} + t_{n2} + t_{n3} + t_{n4} + t_{n5} + t_{n6} + t_{n7} + t_{n8} + t_{n9} \leq t_1 + t_2 + t_3. \quad (8.77)$$

Розрахуємо параметри ефективності пропонованої установки при зневодненні на ній порцій кавового шламу, густину ρ_m якого, також як і деякі конструктивні параметри установки, визначаємо за [5, 64]. За формулою (8.73) знаходимо добову продуктивність зневоднення

$$P_3 = \frac{1,3^2 \cdot 0,2 \cdot 998 \cdot 3600}{13 + 10 + 28} \cdot 8 \cdot 3 = 571466 \text{ кг} = 571,5 \text{ т},$$

що на порядок більше продуктивності технологічного комплексу з чотирьох окремих одиниць обладнання для віброударного зневоднення.

За формулами (8.75, 8.76) з урахуванням умови (8.77) розраховуємо потужності електродвигунів установки

$$N_{III} = 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 10^6 \frac{1 - 4 \cdot 10^6 / 12 \cdot 10^6}{0,87 \cdot 0,85 \cdot 0,98} = 12203,5 \text{ Вт};$$

$$N_{\partial 2} = \frac{0,67 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^6}{0,87 \cdot 0,82 \cdot 0,98} = 1907 \text{ Вт};$$

$$N_{\partial 1} = \frac{(1,2 \cdot 10^{-4} \cdot 2 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot 2) \cdot 0,25 \cdot 1 \cdot 10^6}{0,87 \cdot 0,82 \cdot 0,98} = 157 \text{ Вт};$$

$$N_{\partial 3} = \frac{(7,85 \cdot 10^{-5} \cdot 1 + 5,9 \cdot 10^{-5} \cdot 1) \cdot 0,1 \cdot 1 \cdot 10^6}{0,87 \cdot 0,82 \cdot 0,98} = 19,65 \text{ Вт};$$

$$N_{\partial 4} = \frac{(1 \cdot 10^{-3} \cdot 10 + 6 \cdot 10^{-4} \cdot 10) \cdot 1,6 \cdot 0,25 \cdot 10^6}{0,87 \cdot 0,82 \cdot 0,98} = 9154,2 \text{ Вт};$$

$$N_{\partial 5} = \frac{7,7 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 10^6}{0,87 \cdot 0,82 \cdot 0,98} = 1101 \text{ Вт}.$$

Тоді енергоємність зневоднення за формулою (8.74) складе

$$E_3 = \left[\begin{array}{l} 0,16 \cdot (2 \cdot 2 + 2 \cdot 2) + \\ + 1,9 \cdot (2 \cdot 10 + 2 \cdot 28 + 1 + 1) + \\ + 2 \cdot 12,2 \cdot (13 + 28) + 0,02 \cdot (1 + 1) + \\ + 9,2(10 + 10) + 1,1 \cdot 8 \end{array} \right] \cdot 2 \cdot 1,7 \cdot 0,2 \cdot 998(0,95 - 0,22) = 2,71 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{т},$$

що значно менше 90 кВт • год / т - енергоємності зневоднення аналогічних відходів на обладнанні [175], з яким ми порівнюємо пропонований комплекс.

При реалізації зневоднення на пропонованій установці можна буде скоротити в порівнянні з розробленим автором раніше технологічним комплексом [175] кількість стадій робочого процесу (з 4-х до 3-х) при забезпеченні приблизно аналогічної кінцевої вологості $U_k = 20 - 25\%$ оброблюваного відходів, значно більш високої продуктивності (570 т відходів на добу проти 60 т) і меншою енергоємності (2,71 кВт • год / т проти 90 кВт • год / т). Крім того, істотно будуть знижена загальна матеріаломісткість і габарити обладнання комплексу (2 установки проти 4-х установок), капітальні витрати на його створення і амортизаційні відрахування в процесі експлуатації, підвищена надійність установок (за рахунок загального скорочення числа деталей і вузлів), зменшена тривалість простоїв обладнання в ремонтах і вартість останніх, знижено негативний вплив (рівні шуму, вібрацій, загальний рівень небезпеки) для робітників і обслуговуючого персоналу. У розробленому комплексі передбачена можливість періодичного промивання прес-форми від налиплих твердих частинок без додаткових витрат часу (така можливість відсутня в запропонованому раніше обладнанні [175]), в результаті зменшується тривалість обслуговування комплексу та ще більш зростає його ефективність. Все це дозволяє зробити висновок про те, що використання результатів дослідження на практиці забезпечить значне підвищення економічної ефективності, надійності і безпеки устаткування для зневоднення вологих дисперсних матеріалів.

Вище у даному розділі вказувалось, що за результатами проведених автором експериментів та розрахунків досить раціональним є спосіб тристадійного двокомпонентного віброударного зневоднення на установці з гідроімпульсним приводом [241], який також відноситься до механічних способів і забезпечує продуктивність за зневодненим матеріалом – 20 ÷ 25 т/год, енергоємність – 2,7 кВт•год/т, при кінцевій вологості матеріалу – 20

÷ 25%. Але установка для здійснення даного способу (див. рисунок 8.5) є досить складною конструктивно, дорогою у виготовленні та недостатньо надійною при її використанні в умовах потокового виробництва.

У зв'язку із цим, було поставлене завдання розробки схеми установки для багатостадійного зневоднення вологих дисперсних матеріалів з підвищенням від стадії до стадії інтенсивності навантаження матеріалу та послідовного видалення вільної, капілярно-зв'язаної та адсорбційно-зв'язаної рідкої фази [124]. При цьому дана установка повинна бути достатньо компактною (забезпечувати суміщення у просторі не менше, ніж двох стадій зневоднення), мати високу надійність та мінімальну енергоємність, реалізовувати зневоднення до вказаної вище кінцевої вологості матеріалу при необхідній продуктивності робочого процесу. Також нижче запропоновані залежності для визначення основних робочих параметрів процесів зневоднення на розробленій установці, на підставі яких у подальшому може бути створена методика її проектного розрахунку.

Розроблена автором схема установки для багатостадійного зневоднення вологих дисперсних матеріалів показана на рисунку 8.12. Оброблюваний матеріал з початковою вологістю $U_n = 90 - 95\%$ надходить через заслінку 17, що піднімається за допомогою гідроциліндра 16, у циліндричний бак 19. Після заповнення останнього заслінка 17 опускається та вмикається гідропривод гідроциліндра 12, поршень якого здійснює хід вниз. Пов'язаний зі штоком гідроциліндра поршень 13 витискає матеріал у конічне звуження 20, де він, внаслідок зменшення площі прохідного перерізу стискається, що призводить до зближення твердих частинок матеріалу та видалення з проміжків між ними рідкої фази. Остання витискається через дрібні отвори у стінках звуження 20, закритих з середини фільтрувальною сіткою (на схемі не показані) та стікає у бак 15. Далі поршень гідроциліндра разом з поршнем 13 піднімаються у верхнє положення. При цьому для запобігання піднімання разом з поршнем 13 матеріалу з нижньої частини баку 19 у поршні попередньо відкриваються секторні пази, що зв'язують бак 19 з атмосферою [250] (на схемі пази не показані). Заслінка 17 піднімається, оброблюваний матеріал знову заповнює бак 19. Тим часом попередньо зневоднений у звуженні 20 до вологості $U_I = 85 - 90\%$ матеріал подається у шнековий прес 28, шнек якого приводиться від електродвигуна 29 через редуктор 14. Стискання матеріалу у пресі здійснюється за рахунок сил тертя та внаслідок поступового зменшення кроку шнеку від входу до виходу у прес. Витиснена з оброблюваного матеріалу рідка фаза витікає через дрібні отвори у стінках циліндра преса 28, закритих з середини фільтрувальною сіткою (на схемі не показані) та накопичується у баку 18. Вологість матеріалу на виході з шнекового преса, за нашими оцінками, складатиме $U_{II} = 70 - 75\%$.

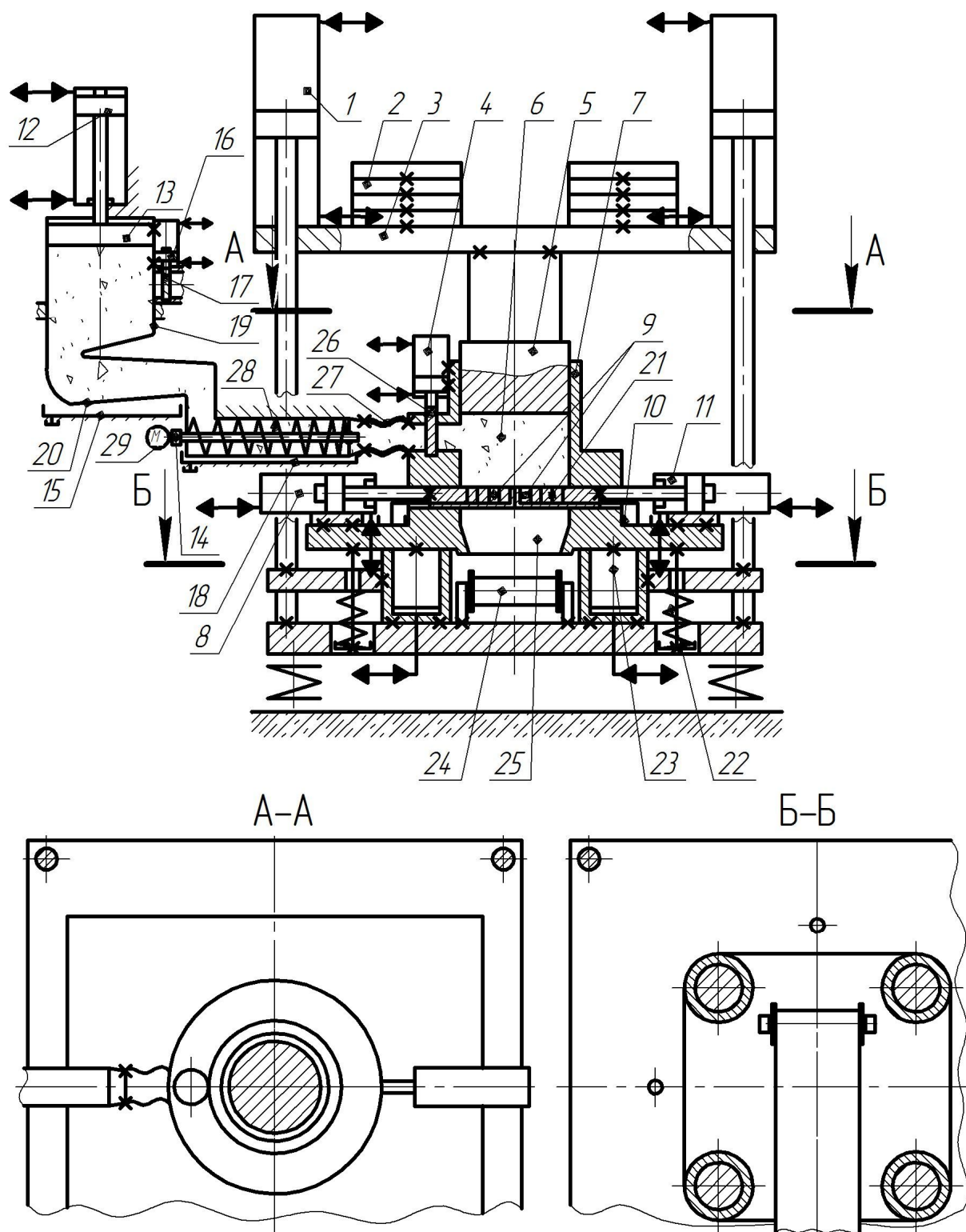


Рисунок 8.12 – Схема установки для багатостадійного зневоднення вологих дисперсних матеріалів

Далі матеріал через гумовотканинний рукав 27 та через відкриту заслінку 26 (керується гідроциліндром 4) завантажується у прес-форму 7. Після заповнення прес-форми 7 заслінка 26 опускається, а робота гідроциліндра 12 та шнекового преса 28 припиняється. Вмикається

гідропривод чотирьох гідроциліндрів 1; робоча рідина подається у поршневі порожнини гідроциліндрів. В результаті траверса 3 з інерційними масами 2 та пуансоном 5 опускається. Пуансон стискає порцію матеріалу 6 у прес-формі 7. Видалена з матеріалу рідина витікає через дрібні отвори і канали 21 у заслінках 9 днища та стінках прес-форми 7, закриті з середини фільтрувальною сіткою (отвори у стінках прес-форми не показані). Видалена з порції рідина збирається у баку 10. Статичне пресування забезпечує вологість матеріалу $U_{III} = 60 - 70\%$. Після її досягнення вмикається гідроімпульсний привод (ГІП) чотирьох гідроциліндрів 23, плунжери яких здійснюють зворотно-поступальні вертикальні переміщення з частотою до 60 Гц і амплітудою 2 – 3 мм. Разом з ними переміщуються прес-форма 7 з матеріалом 6, пуансон 5 та траверси 3 з інерційними вантажами 2. На переміщення прес-форми 7 вгору накладають обмеження пружини 22, тоді як переміщення її вниз обмежують торці корпусів гідроциліндрів 23. В результаті при роботі гідроімпульсного та гідравлічного приводів установки забезпечується найбільш інтенсивне віброударне інерційне навантаження порції матеріалу 6 у поєднанні з його статичним навантаженням, створюваним гідроциліндрами 1 [5]. Після зневоднення порції 6 до вологості $U_{IV} = 20 - 25\%$ приводи гідроциліндрів 1 і 23 вимикаються. За допомогою гідроциліндрів 8, 11 заслінки 9 днища розсуваються в протилежні сторони. Запускається привод гідроциліндрів 1, що забезпечують опускання пуансона 5 у нижнє положення та витискання зневодненої порції 6 через отвір 25 на стрічковий конвеєр 24 (далі цей конвеєр транспортує матеріал до контейнера-збірника). За допомогою гідроциліндра 11 заслінки 9 засуваються у прес-форму 7, пуансон 5 піднімається у верхню позицію. Починається цикл зневоднення наступної порції оброблюваного матеріалу.

Робочий цикл установки можна поділити на три етапи. На I-му етапі відбувається опускання поршня 13, в результаті матеріал витискається з бака 19, зневоднюється під час проходження через звуження 20, у шнековому пресі 28 та заповнює прес-форму 7. Хід та діаметр поршня 13, внутрішні розміри звуження 20, шнекового преса 28, рукава 27, прес-форми 7 та частота обертання $n_{ш}$ шнека преса 28 підібрані таким чином, щоб під час переміщення матеріалу від бака 19 до прес-форми не було розривів його потоку. Таким чином, за час опускання поршня 13 через звуження 20, шнековий прес та рукав 27 проходить однаковий об'єм матеріалу з врахуванням зменшення його вологості, а наприкінці етапу відбувається заповнення прес-форми 7. На II-му етапі реалізується зневоднення матеріалу у прес-формі 7 методом статичного пресування. У продовж III-го етапу здійснюється комбіноване статичне та віброударне інерційне навантаження матеріалу у прес-формі. Тривалість вказаних етапів позначаємо відповідно t_I , t_{II} та t_{III} .

Запишемо залежність для визначення тиску $p_{1-1}(t)$ у середовищі матеріалу на вході у звуження 20 на I-му етапі робочого циклу установки

$$p_{1-1}(t) = p_{1-1cm}(t) + p_{1-1d}(t) - \Delta p_{зв1} - \Delta p_{пов1} =$$

$$= \rho_{в.н} \cdot g \cdot h_{\bar{o}}(t) + E_{\epsilon} \frac{\Delta W_{\bar{o}}(t)}{W_{\bar{o}.н}} - \zeta_{зв1} \frac{\rho_{в.н} v_{зв1}^2}{2} - \zeta_{пов1} \frac{\rho_{в.н} v_{пов1}^2}{2};$$

$$0 \leq t \leq t_I, \quad (8.78)$$

де $p_{1-1cm}(t)$, $p_{1-1d}(t)$ – статична та динамічна складові тиску; $\Delta p_{зв1}$, $\Delta p_{пов1}$ – втрати тиску у середовищі матеріалу при його проходженні звуження на виході з баку та повороту русла на вході у звуження 20 [205]; $\rho_{в.н}$ – густина матеріалу з $U_n = 90 - 95\%$; g – прискорення сили тяжіння; $h_{\bar{o}}(t)$ – змінна висота стовпа матеріалу у баку 19 при опусканні поршня 13; E_{ϵ} – модуль об'ємної пружності матеріалу [5, 204]; $W_{\bar{o}}(t)$ – зміна об'єму матеріалу, обумовлена опусканням поршня 13 та стисканням матеріалу; $W_{\bar{o}.н}$ – початковий об'єм матеріалу у баку 19 до початку опускання поршня 13; $\zeta_{зв1}$, $\zeta_{пов1}$ – коефіцієнти місцевих опорів звуження та на повороті русла; $v_{зв1}$, $v_{пов1}$ – середня швидкість потоку матеріалу у звуженні та на повороті русла, які можна виразити за допомогою рівнянь витрат через швидкість $v_{2.0}$ опускання поршня гідروциліндра 12. При цьому зміною $\rho_{в.н}$ на I-му етапі зневоднення можна знехтувати, у зв'язку із тим, що під час проходження звуження з матеріалу видаляється всього 5 – 10% рідини (див. вище). Крім цього, після зневоднення на I-му етапі матеріал має вологість 85 – 90% і за своїми властивостями наближається до Ньютонівських рідин, густина яких у широкому діапазоні тисків практично не змінюється [202].

Час t_I можна знайти як відношення

$$t_I = \frac{l_2}{v_{2.0}},$$

де l_2 – довжина ходу поршня гідроциліндра 12.

В свою чергу $v_{2.0}$ можна розрахувати, виходячи з номінальної подачі насоса $Q_{н1}$ та ефективної площі $S_{н.2}$ поршня гідроциліндра 12 з боку поршневої порожнини

$$v_{2.0} = \frac{Q_{н1}}{S_{н.2}}.$$

З врахуванням вищевикладеного рівняння (8.78) переписеться у вигляді

$$p_{1-1}(t) = \rho_{6.n} \cdot g \cdot v_{2.o} t + E_6 \frac{S_{\bar{o}} v_{2.o} t}{W_{\bar{o}.n}} - \zeta_{361} \frac{\rho_{6.n} (S_{\bar{o}} v_{2.o})^2}{2 \cdot S_{361}^2} - \zeta_{no\bar{d}} \frac{\rho_{6.n} (S_{\bar{o}} v_{2.o})^2}{2 \cdot S_{no\bar{d}}^2} =$$

$$0 \leq t \leq t_I, (8.79)$$

$$= v_{2.o} t \cdot \left(\rho_{6.n} \cdot g + E_6 \frac{S_{\bar{o}}}{W_{\bar{o}.n}} \right) - \frac{\rho_{6.n} (S_{\bar{o}} v_{2.o})^2}{2} \left(\frac{\zeta_{361}}{S_{361}^2} - \frac{\zeta_{no\bar{d}}}{S_{no\bar{d}}^2} \right);$$

де $S_{\bar{o}}$, S_{361} , $S_{no\bar{d}}$ – площі поперечного перерізу бака 19, звуження на виході з баку та повороту русла.

Рівняння для визначення тиску у середовищі оброблюваного матеріалу на виході зі звуження на I-му етапі робочого циклу установки

$$p_{2-2}(t) = p_{1-1}(t) - \zeta_{362} \frac{\rho_{mI} (S_{\bar{o}} v_{2.o})^2}{2 \cdot S_{362}^2}; 0 \leq t \leq t_I, (8.80)$$

де S_{362} – площа кінцевого поперечного перерізу звуження; ζ_{362} – коефіцієнт його місцевого опору; ρ_{mI} – густина матеріалу після I-го етапу зневоднення з $U_I = 85 - 90\%$, що може бути визначена за формулою

$$\rho_{mI} = \frac{m_p \left(1 - \frac{U_n - U_I}{100} \right) - m_m \left(1 + \frac{U_n - U_I}{100} \right)}{V}, (8.81)$$

в якій m_p , m_m – маси рідкої та твердої фаз у порції матеріалу з U_n , об'ємом V .

Зміну тиску $p_{3-3}(t)$ у середовищі оброблюваного матеріалу у перерізі на виході з шнекового пресу на I-му етапі робочого циклу установки, з врахуванням підвищення тиску за довжиною циліндра преса [14] визначаємо як

$$p_{3-3}(t) = \frac{e^{A \cdot l_w}}{\rho_{mII} \cdot g} \left(p_{2-2}(t) - \zeta_{no\bar{e}2} \frac{v_{no\bar{e}2}^2}{2} \rho_{mII} \right) = \frac{e^{A \cdot l_w}}{\rho_{mII} \cdot g} \left(p_{2-2}(t) - \zeta_{no\bar{e}2} \frac{(S_{\bar{o}} v_{2.o})^2}{2 \cdot S_{no\bar{e}2}^2} \rho_{mII} \right) =$$

$$= \frac{e^{A \cdot l_w}}{\rho_{mII} \cdot g} \left(p_{2-2}(t) - \zeta_{no\bar{e}2} \frac{(S_{\bar{o}} v_{2.o})^2}{2 \cdot S_{no\bar{e}2}^2} \rho_{mII} \right); 0 \leq t \leq t_I, (8.82)$$

де A – постійний коефіцієнт [14]; l_w – довжина внутрішньої порожнини циліндра шнекового преса 28; $\zeta_{no\bar{e}2}$ – коефіцієнт місцевого опору повороту русла на вході у шнековий прес; $v_{no\bar{e}2}$ – середня швидкість потоку матеріалу на повороті русла; $S_{no\bar{e}2}$ – площа поперечного перерізу

повороту русла; ρ_{MII} – густина матеріалу після II-го етапу, що обчислюється за формулою

$$\rho_{MII} = \frac{m_p \left(1 - \frac{U_n - U_{II}}{100} \right) - m_m \left(1 + \frac{U_n - U_{II}}{100} \right)}{V}, \quad (8.83)$$

Тиск у середовищі матеріалу у поперечному перерізі $S_{n,\phi}$ прес-форми 7 на етапі статичного пресування матеріалу тривалістю t_{II} визначаємо за формулою

$$p_{4-4c} = \frac{4 \cdot p_{p.c} S_n + g(4 \cdot m_{n,u} + m_m + m_{i.6} + m_n)}{S_{n,\phi}}, \quad (8.84)$$

в якій $p_{p.c}$ – номінальний тиск робочої рідини у порожнинах гідроциліндрів 1 під час статичного пресування; S_n – ефективна площа поршня гідроциліндра 1 з боку штокової порожнини; $m_{n,u}$, m_m , $m_{i.6}$, m_n – маси штока та поршня гідроциліндра 1, рухомої траверси 3, інерційних мас 2 та пуансона 5.

Тиск у середовищі матеріалу у перерізі $S_{n,\phi}$ під час віброударного зневоднення на етапі переміщення прес-форми 7 вверх при використанні у ГПП установки вібробуджувача, приєднаного за схемою «на виході» [64] знаходимо як

$$p_{4-4.6}(t) = \frac{4 \cdot p_{p.c} S_n + (g + \frac{g}{2})(4 \cdot m_{n,u} + m_m + m_{i.6} + m_n) + 4 \cdot p_{nл.6}(t) \cdot S_{nл} - 4 \cdot c_n z - R_n}{S_{n,\phi}},$$

$$0 \leq t \leq k_y T_y, \quad (8.85)$$

де z – переміщення прес-форми; $p_{nл.6}(t)$ – зміна тиску у порожнинах гідроциліндрів 23 на етапі переміщення прес-форми вверх (рисунок 8.13) [64]; $S_{nл}$ – площа поперечного перерізу плунжера гідроциліндра 23; c_n – коефіцієнт жорсткості пружин 22; R_n – сила сухого тертя у напрямних траверси 3; k_y – коефіцієнт, що визначає тривалість t_e переміщення плунжерів гідроциліндрів 23 вверх в частках від періоду T_y спрацьовування ГПП [239]. Тривалість t_e можна приблизно прийняти рівною тривалості збільшення тиску робочої рідини у порожнинах гідроциліндрів 23 ГПП від p_2 – закриття вібробуджувача до p_1 – його відкриття.

Згідно із графіком на рисунку 8.13 тиск $p_{nл.6}(t)$ робочої рідини у порожнинах гідроциліндрів 23 на етапі переміщення прес-форми вверх, у випадку приєднання вібробуджувача за схемою «на виході» можна наближено визначити як

$$p_{нл.в}(t) = \left(\frac{p_1 - p_2}{t_в} \right) t + p_2 = \left(\frac{p_1 - p_2}{k_u T_u} \right) t + p_2; \quad 0 \leq t \leq k_u T_u. \quad (8.86)$$

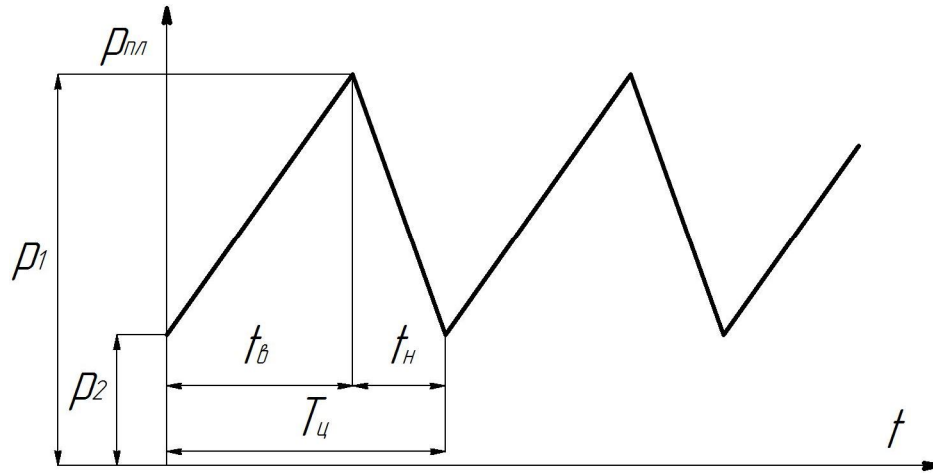


Рисунок 8.13 – Характер зміни тиску у порожнині гідроциліндра ГП з вібробудувачем «на виході»

За цим графіком тиск $p_{нл.н}(t)$ робочої рідини у порожнинах гідроциліндрів 23 на етапі переміщення прес-форми вниз обчислюється за рівнянням

$$p_{нл.н}(t) = p_1 - \left(\frac{p_1 - p_2}{t_н} \right) t = p_1 - \left(\frac{p_1 - p_2}{(1 - k_u) T_u} \right) t; \quad k_u T_u < t \leq T_u. \quad (8.87)$$

А рівняння для визначення тиску у середовищі матеріалу у перерізі $S_{н.ф}$ під час віброударного зневоднення на етапі переміщення прес-форми 7 вниз матиме вигляд

$$p_{4-4.н}(t) = \frac{4 \cdot p_{p.c} S_n + (\rho \cdot g) (4 \cdot m_{н.ш} + m_m + m_{i.в} + m_n) + 4 \cdot p_{нл.н}(t) \cdot S_{нл} - 4 \cdot c_n z + R_n}{S_{н.ф}};$$

$$k_u T_u < t \leq T_u. \quad (8.88)$$

Витрати $Q_{зв}(t)$ при витіканні рідкої фази матеріалу з отворів звуження 20 при опусканні поршня 13 визначаємо з врахуванням того, що основний опір цьому витіканню створюють тверді частинки матеріалу, що зневоднюється. При цьому частина рідини видаляється за рахунок перепаду тиску, створюваного поршнем 13 та стовпом матеріалу у баку 19, а інша частина – завдяки зменшенню займаного матеріалом об'єму у звуженні 20. Таким чином, можна записати

$$Q_{36}(t) = \mu_{61} S_{362}^2 \sqrt{\frac{2 \left[\left(p_{1-1}(t) - l \frac{(p_{1-1}(t) - p_{2-2}(t))}{l_{362}} \right) - p_a \right]}{\rho_{6n}}} +$$

$$+ \frac{(\pi \cdot l_{362} (r_{nob1}^2 + r_{nob1} r_{362} + r_{362}^2) / 3 - S_{362} l_{362})}{l^2 \pi \cdot (r_{nob1} - r_{362})^2 / S_{\sigma} v_{2.0} l_{362}},$$

$$0 \leq t \leq t_I, \quad (8.89)$$

де μ_{61} – питомий коефіцієнт витрат для одиниці площі шару матеріалу, що знаходиться у середньому за довжиною перерізі звуження й товщина якого складає половину суми вхідного - r_{nob1} та вихідного - r_{362} перерізів звуження (може бути визначений експериментально при пропусканні через зразок даного шару матеріалу рідкої фази, з використанням датчиків витрат та тиску); S_{362} – площа поверхні звуження 20; l, l_{362} – поточна та максимальна довжина звуження; p_a – атмосферний тиск.

Витрати рідкої фази матеріалу, що витікає з циліндру шнекового преса 28 для етапу опускання поршня 13 визначаємо за формулою

$$Q_u(t) = \mu_{62} S_{u.n}^2 \sqrt{\frac{2 \left[\left(p_{3-3}(t) + \frac{p_{3-3}(t) - p_{2-2}(t)}{l_u} l \right) - p_a \right]}{\rho_{6l}}}; \quad 0 \leq t \leq t_I, \quad (8.90)$$

де μ_{62} – питомий коефіцієнт витрат для одиниці площі шару матеріалу, що знаходиться у середньому за довжиною перерізі корпусу шнекового преса (також може бути визначений експериментально); $S_{u.n}$ – площа поверхні корпусу шнекового преса.

Витрати рідкої фази матеріалу через бокові стінки та днище прес-форми 7 із загальною площею поверхні $S_{n.\phi\Sigma}$, з врахуванням зменшення цієї площі в міру видалення з порції б рідини, зменшення об'єму порції, а отже й $S_{n.\phi\Sigma}$ знайдемо за формулою

$$Q_{c.n}(t) = \mu_{63} \left(S_{n.\phi\Sigma} - \frac{Q_{c.n}(t)}{S_{n.\phi} t} \right) \sqrt{\frac{2[p_{4-4c}(t) - p_a]}{\rho_{6II}}} = \mu_{63} S_{n.\phi\Sigma} \sqrt{\frac{2[p_{4-4c}(t) - p_a]}{\rho_{6II}}} -$$

$$- \mu_{63} \frac{Q_{c.n}(t)}{S_{n.\phi} t} \sqrt{\frac{2[p_{4-4c}(t) - p_a]}{\rho_{6II}}}; \quad t_I < t \leq t_{II},$$

$$8.91)$$

де μ_{63} – питомий коефіцієнт витрат для одиниці площі шару матеріалу, що знаходиться у поперечному перерізі прес-форми 7 (визначається експериментально). Далі перетворюємо рівняння (8.91) до вигляду

$$Q_{c.n}(t) = \mu_{63} S_{n.\phi\Sigma} \sqrt{\frac{2[p_{4-4c}(t) - p_a]}{\rho_{6II}}} \left/ \left[1 + \frac{\mu_{63}}{S_{n.\phi} t} \sqrt{\frac{2[p_{4-4c}(t) - p_a]}{\rho_{6II}}} \right] \right.; t_I < t \leq t_{II}. \quad (8.92)$$

Складаємо подібні формули для визначення витрат рідини, що витікає з прес-форми 7 у продовж першого циклу віброударного навантаження порції 6 під час переміщення прес-форми вгору – $Q_{в.н}(t)$ та під час її руху вниз – $Q_{н.н}(t)$. При цьому зменшенням об'єму порції 6, а отже й опусканням пуансона у продовж даного циклу навантаження можна знехтувати

$$Q_{в.н}(t) = \mu_{63} \left(S_{n.\phi\Sigma} - \frac{Q_{c.n}(t_{I+1}) + Q_{c.n}(t_{II})}{2 \cdot S_{n.\phi} (t_{II} - t_I)} \right) \sqrt{\frac{2[p_{4-4в}(t) - p_a]}{\rho_{6III}}}; 0 \leq t \leq k_u T_u; \quad (8.93)$$

$$Q_{н.н}(t) = \mu_{63} \left(S_{n.\phi\Sigma} - \frac{Q_{c.n}(t_{I+1}) + Q_{c.n}(t_{II})}{2 \cdot S_{n.\phi} (t_{II} - t_I)} \right) \sqrt{\frac{2[p_{4-4н}(t) - p_a]}{\rho_{6III}}}; k_u T_u < t \leq T_u.$$

При цьому густину ρ_{6III} матеріалу після III-го етапу зневоднення розраховуємо як

$$\rho_{6III} = \frac{m_p \left(1 - \frac{U_n - U_{III}}{100} \right) - m_m \left(1 + \frac{U_n - U_{III}}{100} \right)}{V} \dots \quad (8.94)$$

У роботі [5] на підставі розрахунків та експериментів обґрунтовується, що проблема утилізації вологих дисперсних відходів харчових виробництв повинна вирішуватись комплексно за допомогою високоефективного обладнання для зневоднення та фільтрування. При цьому фільтрування необхідне для очищення фільтрату відходів, видаленого на стадіях попереднього та остаточного зневоднення, від найдрібніших твердих частинок для забезпечення можливості безпечного зливання фільтрату у найближчі водойми або для повторного використання його на виробництві.

Якщо аналізу ефективності різних способів зневоднення вологих дисперсних матеріалів та обґрунтуванню доцільності використання

віброударного зневоднення у розділах монографії приділено багато уваги, то способи фільтрування до сих пір детально не розглядалися.

Найбільш відомими серед них є способи очищення вологих дисперсних матеріалів з використанням вакуумних фільтрів, а також трубчастих або дискових керамічних фільтрувальних мембран (спосіб тангенціального потокового фільтрування [251]). Дані способи в більшості випадків не забезпечують достатньо високої продуктивності робочого процесу [252, 253]. Крім того, фільтри з часом засмічуються, що змушує зупиняти процес і здійснювати їх очищення. Запропонований автором спосіб потокового віброударного фільтрування та обладнання для його реалізації в порівнянні із вказаними вище дозволяє підвищити продуктивність (на $18 \div 31\%$ - при фільтруванні спиртової барди, бурякового жому та кавового шламу), а також практично усунути необхідність періодичного очищення фільтрувальних мембран [252, 254]. Все це дає підставу розглядати обладнання з ГПП для віброударного зневоднення і фільтрування як досить перспективне.

Одним з вітчизняних підприємств харчової промисловості була поставлена задача розробки високоефективного обладнання для утилізації відходів харчових виробництв з використанням способів багатостадійного віброударного зневоднення та фільтрування, із забезпеченням високої продуктивності робочих процесів (від 1 до 10 т відходів / год), низької енергоємності (близько 90 кВт / т вилученої рідини), при кінцевій вологості твердої фази відходів 20 - 22% та за умови простоти, надійності та дешевизни використовуваного обладнання [5]. З врахуванням отриманих автором результатів теоретичних та експериментальних досліджень, в якості привода проектного обладнання був вибраний ГПП.

Для забезпечення вказаних вище параметрів ефективності гідроімпульсного обладнання для віброударного зневоднення і фільтрування необхідно розробити блок-схему алгоритму синтезу на його основі технологічних ліній для утилізації відходів харчових виробництв, з урахуванням їх фізико-механічних характеристик, добової маси відходів на підприємстві, режиму роботи останнього, способу подальшого використання відходів і ряду інших чинників [255]. Крім того, необхідний алгоритм для визначення основних виробничих і робочих показників проектової лінії (продуктивності, потужності і енергоємності обладнання, параметрів режиму навантаження). Описані завдання вирішуються в даному підрозділі нижче.

При цьому, першу групу вихідних параметрів для проектування технологічної лінії утворюють фізико-механічні характеристики оброблюваного матеріалу [5]. При цьому враховується його вид (в ряді випадків у підприємства може виникнути необхідність утилізації відходів декількох видів, наприклад, кавового і ячмінного шламу), початкова U_n і кінцева U_k вологість, початкова густина - ρ_m і щільність $\rho_{m.o}$ після

остаточного зневоднення, тип і інтенсивність зв'язків між частинками твердої і рідкої фаз матеріалу [5, 251], діаметр $d_{m.ч}$ і молекулярна маса M_m твердих частинок матеріалу.

Так, вид матеріалу і відповідні йому тип і інтенсивність зв'язків між частинками фаз визначають кількість необхідних стадій віброударного зневоднення для досягнення заданої U_k твердої фази. Очевидно, що при наявності в середовищі матеріалу більш інтенсивного зв'язку між частинками необхідна кількість стадій зневоднення збільшується. Крім того, від зазначених фізико-механічних характеристик залежить потужність, продуктивність, конструкція і режим роботи устаткування проекрованої лінії. Наприклад, відповідно до результатів експериментальних досліджень автора [5], при віброударному зневодненні на гідроімпульсному стенді при одних і тих же режимах віброударного навантаження в прес-формі закритого типу однакових за масою порцій спиртової барди, бурякового жому та кавового шламу з $U_n = 75\%$: U_k порцій становила відповідно 24, 22 і 20%. У свою чергу, $d_{m.ч}$ і M_m дозволяють визначити необхідну кількість стадій віброударного фільтрування для досягнення необхідного допустимого вмісту хімічних і біологічних домішкових компонентів рідкої фази і забезпечення можливості її нешкідливого повернення в природу або повторного використання на виробництві [5, 251]. Так, при $d_{m.ч} \geq 0,1 \div 10$ мкм і $M_m = 1000 \div 500000$ достатньо однієї стадії мікрофільтрування; при $d_{m.ч} \geq 0,01 \div 0,1$ мкм і $M_m = 1000 \div 100000$ - необхідно послідовно здійснювати стадії мікро- і ультрафільтрування; при $d_{m.ч} \geq 3 \div 10$ мкм і $M_m = 200 \div 400$ - здійснюються мікро-, ультра- і нанофільтрування.

Виходячи з U_n і U_k може бути розрахована необхідна продуктивність віброударного зневоднення і фільтрування - $P_{з,ф}$ [5]. Густина ρ_m береться за основу при розрахунку маси оброблюваної порції матеріалу, а отже і потужності проектового обладнання (див. нижче).

Друга група вихідних параметрів для проектування пов'язана з підприємством, на якому буде здійснюватися утилізація відходів. При цьому в першу чергу враховується режим роботи підприємства: кількість змін - $n_{зм}$ і тривалість $T_{р.зм}$ роботи обладнання протягом зміни, а також добова маса $m_{м.д}$ утилізованих відходів. Виходячи з них прораховується необхідна продуктивність - $P_{з,ф}$, енергоємність - $E_{з,ф}$ і потужність ($N_{з1}, N_{з2}, \dots; N_{ф1}, N_{ф2}, \dots$) обладнання лінії. Також розглядається питання розміщення проекрованої лінії. Очевидно, що більш раціональною буде установка лінії в наявних на підприємстві цехах, а найкраще - в цеху, в якому накопичуються відходи, що утилізуються. В останньому випадку будуть мінімізовані витрати на транспортування оброблюваного матеріалу від накопичувального бункера до лінії. Однак при цьому, як правило, посилюються вимоги до допустимих габаритів лінії і до її компонованні. Якщо ж розміщення лінії на наявних площах не представляється

можливим, для неї проектується додатковий окремий цех, прибудований до цеху з накопичувачем матеріалу. При наявності на підприємстві незадіяного обладнання для зневоднення і фільтрування (шнекових пресів, декантерних центрифуг, фільтрувальних установок), його доцільно включити до складу проекрованої лінії для використання на стадіях попереднього зневоднення і фільтрування [5].

Третя група вихідних факторів і параметрів враховує, те, яким чином будуть використовуватися відходи, що утилізуються. У разі їх передбачуваної реалізації в якості кормових добавок з попередніми зберіганням на складі, необхідно порівняти U_k , яку забезпечить проектована лінія після остаточного механічного зневоднення із заданою $U_{k.з}$. Якщо $U_k > U_{k.з}$ слід передбачити додаткову сушку для виконання умови $U_k \leq U_{k.з}$. Якщо ж тверду фазу відходів після зневоднення використовуватимуть як добриво або як паливо (кавовий і ячмінний шлам [5]), тоді, що забезпечується після остаточного віброударного зневоднення $U_k = 20 \div 22\%$ [5] є цілком прийнятною.

З урахуванням усього вищевикладеного, автором була розроблена блок-схема алгоритму синтезу структури технологічних ліній для зневоднення і фільтрування відходів харчових виробництв, представлена на рисунку 8.14.

На схемі, крім зазначених вище параметрів, позначені: переважний тип зв'язків в середовищі оброблюваного матеріалу між частинками твердої і рідкої фаз: ФМ - фізико-механічний зв'язок, В - вільна рідина (переважним будемо називати тип зв'язку, характерний для більш ніж 50% обсягу матеріалу, що зневоднюється); інтенсивність зв'язків між частинками фаз: ІВ - інтенсивність висока, ІС - інтенсивність середня, ІН - інтенсивність низька (для кожного ступеня інтенсивності можна вказати точні діапазони чисельних значень сил взаємодії часток, що діють в більш ніж 50% обсягу матеріалу, що зневоднюється).

При необхідності реалізації всіх чотирьох стадій зневоднення ($n_{ст.о} = 4$) технологічна лінія може включати: віброударне сито з ГП для попереднього зневоднення відходів до вологості 80 - 85%, шнековий прес - для зневоднення до вологості 75 - 80%, вібропрес з ГП - для зневоднення до вологості 70 - 75 і вальцюву установку з ГП для остаточного зневоднення до вологості 20 - 25% [5].

Кожна зі стадій мікро-, ультра- і нанофільтрування здійснюється на окремій установці з ГП, при цьому всі установки можуть бути виконані за єдиною схемою, але з використанням різних мембран (відповідно для мікро-, ультра- і нанофільтрування) і зі збільшенням від першої до останньої стадії перепаду тиску між внутрішніми і зовнішніми поверхнями мембран [5].

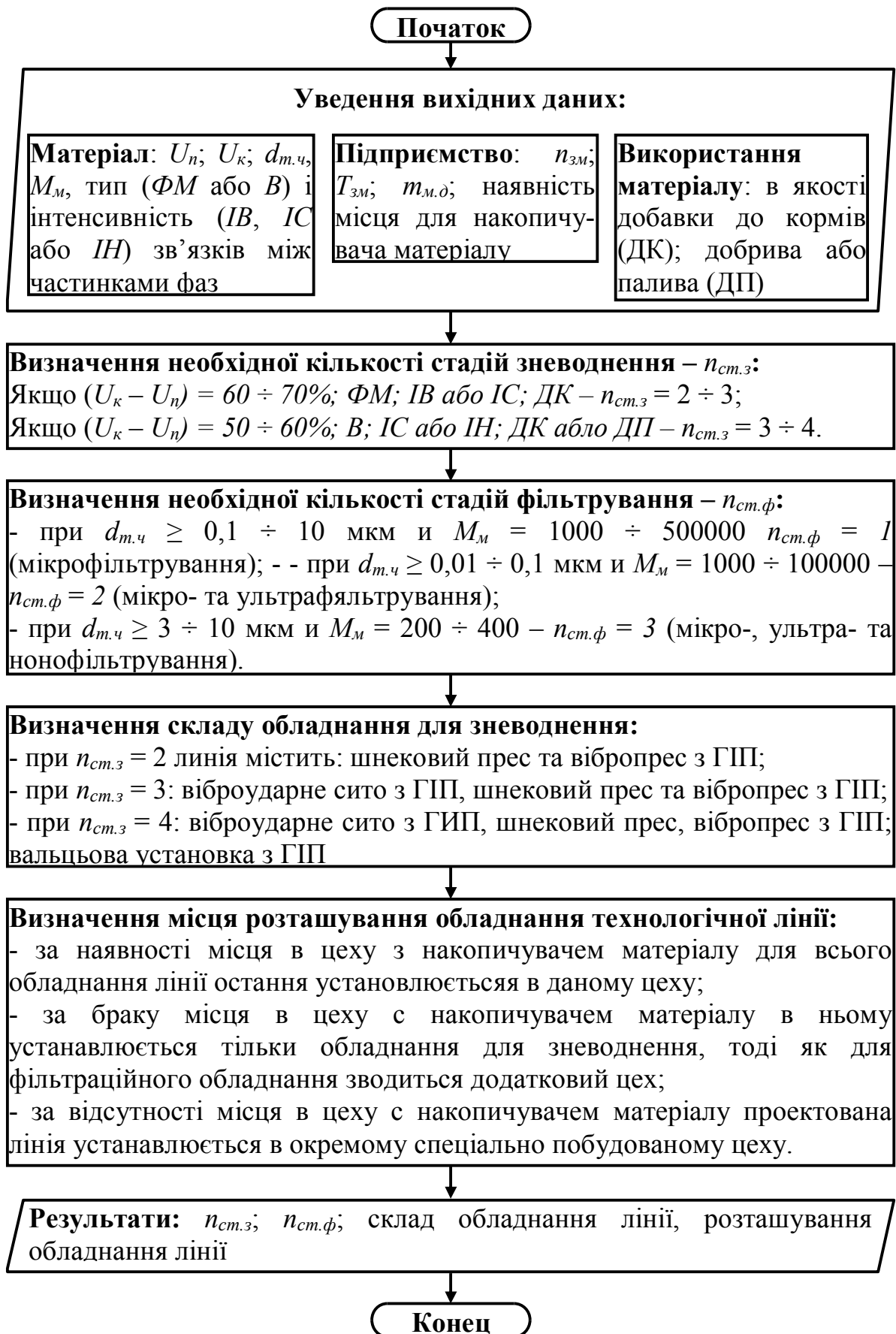


Рисунок 8.14 - Блок-схема алгоритму синтезу структури технологічних ліній для утилізації відходів харчових виробництв

На другому етапі проектування технологічної лінії для утилізації розраховуються її основні робочі параметри (рисунок 8.15). При цьому першим кроком є визначення необхідної продуктивності зневоднення і фільтрування за формулою

$$P_{з,ф} = \frac{U_k - U_n}{100\% \cdot n_{зм} T_{р.зм}} \quad (8.95)$$

Параметрами режимів віброударного зневоднення є частота ν і амплітуда z_{1a} зворотно-поступальних переміщень виконавчого елемента ГПП обладнання, а також максимальний тиск робочої рідини $p_{г.мах}$ в порожнині гідроциліндра ГПП [5]. При віброударному фільтруванні параметрами навантаження є: частота ν і амплітуда z_{1a} коливань виконавчого елемента ГПП установки, а також максимальний тиск $p_{м.мах}$ в середовищі оброблюваного матеріалу, що циркулює по каналах трубчастої металокерамічної фільтрувальної мембрани [5].

Оптимальні параметри навантаження при віброударному зневодненні визначаємо розрахунковим шляхом [5] або за допомогою експериментальних стендів-прототипів проектного обладнання (віброударної сита, вібропреса і вальцьової установки з ГПП [5]) на підставі отриманих залежностей $P_{з,ф} - z_{1a}$, $P_{з,ф} - \nu$, $P_{з,ф} - p_{г.мах}$, $U_k - z_{1a}$, $U_k - \nu$, $U_k - p_{г.мах}$. Відповідно, оптимальні параметри режимів віброударного фільтрування (z_{1a} , ν , $p_{ф.мах}$) розраховуємо за формулами [1] або з використанням експериментальних установок з ГПП для віброударного мікро-, ультра- і нанофільтрування, після аналізу залежностей $P_{з,ф} - z_{1a}$, $P_{з,ф} - \nu$, $P_{з,ф} - p_{м.мах}$.

Далі обчислюємо потужності електродвигунів обладнання лінії. Сумарну потужність електродвигунів віброударного сита з ГПП для попереднього зневоднення [5] знаходимо за формулою

$$N_{з1} = N_{е.ГПП} + N_{е.к\Sigma} + N_{е.в\Sigma}, \quad (8.96)$$

в якій $N_{е.ГПП}$ - потужність електродвигуна ГПП вертикальних коливань верхньої гілки основного конвеєра сита, на якому відбувається зневоднення; $N_{е.к\Sigma}$ - сумарна потужність електродвигунів приводів основного і допоміжного конвеєрів (останній слугує для збирання і відведення залишків матеріалу, що видаляються скребком зі стрічки основного конвеєра); $N_{е.в\Sigma}$ - сумарна потужність електродвигунів вентиляторів для просушки залишків матеріалу на нижній гілці основного конвеєра з метою його максимально повного видалення.

Складову $N_{е.ГПП}$ у формулі (8.96) розраховуємо як [5]

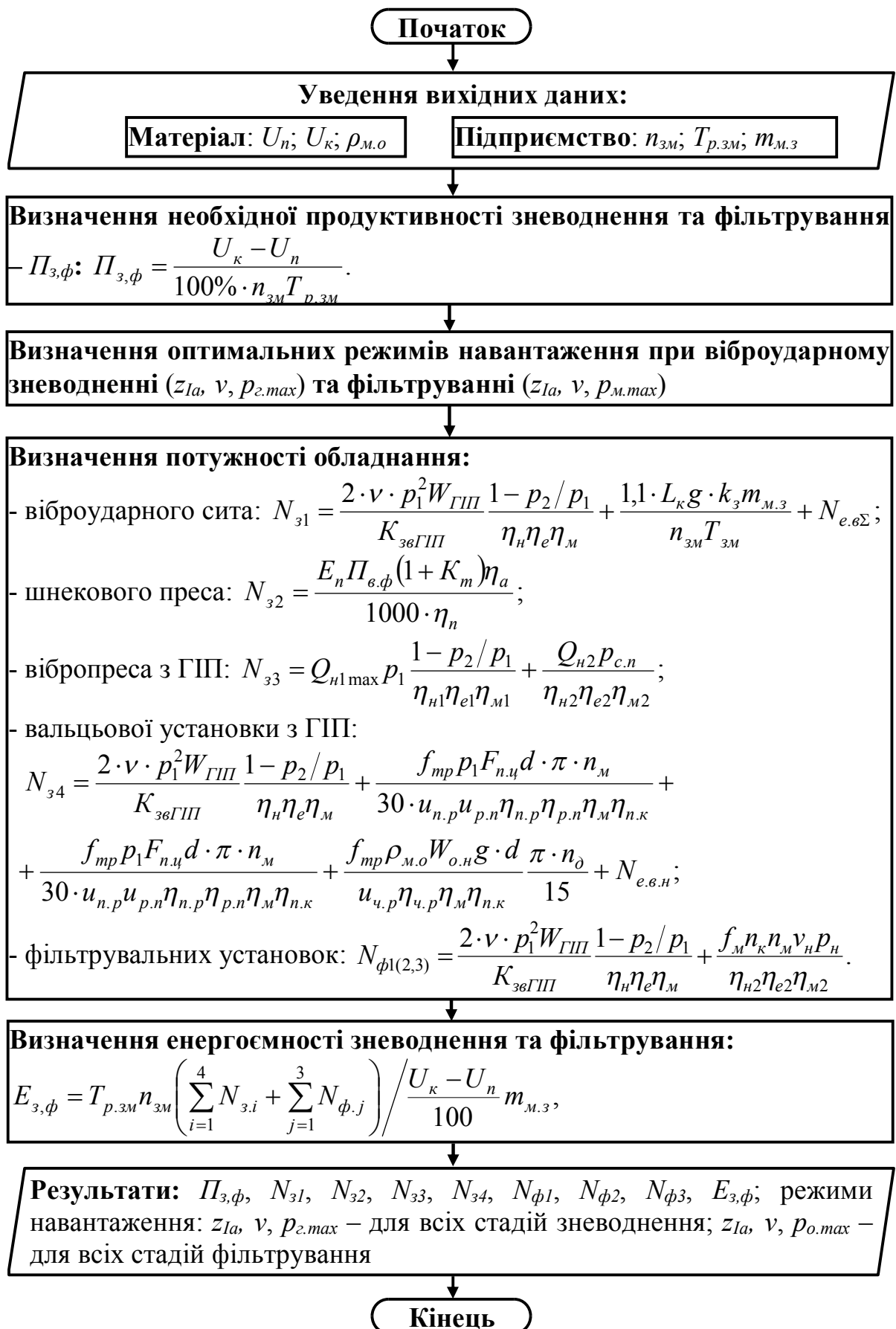


Рисунок 8.15 - Блок-схема алгоритму визначення робочих параметрів технологічних ліній для утилізації відходів харчових виробництв

$$N_{e.ГПШ} = Q_{н1} p_1 \frac{1 - p_2/p_1}{\eta_n \eta_e \eta_m}, \quad (8.97)$$

де $Q_{н1}$ - продуктивність насоса ГПШ сита; p_1, p_2 - тиск відкриття і закриття вібробудника ГПШ [5], підключеного за схемою «на виході» [65] (максимальний і мінімальний тиск робочої рідини в гідросистемі ГПШ); η_n, η_e, η_m - ККД насоса, електродвигуна і муфти ГПШ.

З огляду на, що тривалість $t_{н.м}$ етапу набору тиску від p_2 до p_1 в об'ємі ГПШ з вібробуджувачем «на виході» становить не більше половини тривалості $T_{ц}$ циклу його спрацьовування [65]; а також те, що де $W_{ГПШ}$ – об'єм ГПШ, в якому відбувається збільшення тиску від p_2 до p_1 , а $K_{звГПШ}$ - зведений модуль об'ємної пружності об'єму $W_{ГПШ}$ і робочої рідини в ньому, формулу (8.97) переписуємо у вигляді

$$N_{e.ГПШ} = \frac{2 \cdot v \cdot p_1^2 W_{ГПШ}}{K_{звГПШ}} \frac{1 - p_2/p_1}{\eta_n \eta_e \eta_m}. \quad (8.98)$$

При горизонтальному установленні конвеєрів сита потужність $N_{e.к\Sigma}$ можна визначити за формулою [256]

$$N_{e.к\Sigma} = 1,1 \cdot F_m v_k = 1,1 \cdot m_{м.к} g \cdot k_o v_k = 1,1 \cdot L_k B_k h_m \rho_m g \cdot k_o v_k, \quad (8.99)$$

в якій F_m - необхідна тягова сила конвеєра; v_k - середня швидкість переміщення стрічки конвеєра; $m_{м.к}$ - маса матеріалу на верхній гілці конвеєрів (приблизно можна прийняти, що $m_{м.к}$ на допоміжному конвеєрі становить 1/10 маси $m_{м.к}$ на основному конвеєрі, внаслідок чого використовуємо коефіцієнт 1,1); k_o - коефіцієнт опору руху [256]; L_k, B_k - довжина і ширина конвеєрів; h_m - товщина шару матеріалу на верхній гілці основного конвеєра. Для визначення оптимальних v_k, L_k, h_m за умови забезпечення необхідних $\Pi_{з,ф}$ і $U_k = 80 \div 85\%$ слід провести експерименти на віброударному ситі - прототипі. Ширину B_k розраховуємо з умови

$$\frac{m_{м.з}}{n_{зМ} T_{зМ}} = h_m B_k v_k \rho_m. \quad (8.100)$$

тоді

$$B_k = \frac{m_{м.з}}{n_{зМ} T_{зМ} h_m v_k \rho_m}. \quad (8.101)$$

Після підстановки формули (8.101) в формулу (8.99) отримуємо

$$N_{e.к\Sigma} = \frac{1,1 \cdot L_k g \cdot k_c m_{м.з}}{n_{зМ} T_{зМ}}. \quad (8.102)$$

Оптимальна $N_{e.6\Sigma}$ також визначається експериментально на дослідному віброударному ситі для виконання умови рівномірного просушування залишків відходів на нижній гілці основного конвеєра і їх практично повного видалення з останньої.

Потужність електродвигуна шнекового преса визначаємо за залежністю [40]

$$N_{з2} = \frac{E_n \Pi_{в.ф} (1 + K_m) \eta_a}{1000 \cdot \eta_n}, \quad (8.103)$$

де E_n - питома витрата енергії на пресування; K_m - коефіцієнт втрати енергії на тертя ($K_m = 3 \div 5$); η_a - коефіцієнт запасу потужності; η_n - ККД передачі від електродвигуна до шнек [40].

Потужність електродвигунів вібропреса з ГПП знаходимо за формулою

$$N_{з3} = N_{e.ГПП} + N_{e.д.н}, \quad (8.104)$$

в якій $N_{e.ГПП}$ - потужність електродвигуна ГПП вертикальних зворотно-поступальних переміщень вібростолу з прес-формою, через яку проходять оброблюваний матеріал; $N_{e.д.н}$ - потужність електродвигуна допоміжного приводу вібропреса, що створює статичне притискання пуансона до порції відходів в прес-формі [5].

Складову $N_{e.ГПП}$ обчислюємо за формулою [5]

$$N_{e.ГПП} = Q_{н1max} p_1 \frac{1 - p_2 / p_1}{\eta_{н1} \eta_{e1} \eta_{м1}}, \quad (8.105)$$

де $Q_{н1max}$ - максимальна подача насоса ГПП; p_1, p_2 - тиск відкриття і закриття віброзбудника ГПП, підключеного за схемою «на вході» [65]; $\eta_{н1}, \eta_{e1}, \eta_{м1}$ - ККД насоса, електродвигуна і муфти ГПП.

Потужність $N_{e.д.н}$ розраховуємо як

$$N_{e.д.н} = \frac{Q_{н2} p_{с.н}}{\eta_{н2} \eta_{e2} \eta_{м2}}, \quad (8.106)$$

де $Q_{н2}$ - подача насоса допоміжного приводу; $p_{с.н}$ - максимальний необхідний для віброударного зневоднення на проектованому вібропресі тиск статичного притискання пуансона (може бути розрахований за [5], або визначений експериментально за залежностями $z_{la} - P_{см}, v - P_{см}, p_{e,max} -$

P_{cm} [5] (P_{cm} - зусилля статичного притискання, яке залежить від $p_{c.n}$ і площі поршня допоміжного гідроциліндра - $S_{n.d}$: $P_{cm} = p_{c.n}S_{n.d}$); η_{n2} , η_{e2} , η_{m2} - ККД насоса, електродвигуна і муфти допоміжного приводу.

Потужність N_{34} вальцьової установки з ГПІ для остаточного зневоднення [5] визначаємо як

$$N_{34} = N_{e.ГПІ} + N_{e.m} + N_{e.в} + N_{e.в.н} + N_{e.д}, \quad (8.107)$$

де $N_{e.ГПІ}$ - потужність електродвигуна ГПІ установки, що забезпечує вертикальні зворотно-поступальні переміщення двох вальців, які створюють віброударне навантаження відходів зверху [5] - може бути розрахована за формулою (8.98); $N_{e.m}$ - потужність електродвигуна приводу обертання матриці установки, на яку рівномірним тонким шаром вивантажується матеріал, що зневоднюється [5]; $N_{e.в}$ - сумарна потужність електродвигунів приводу обертання вальців установки [5]; $N_{e.в.н}$ - потужність електродвигуна вакуумного насоса для відсмоктування зневодненого матеріалу з поверхні матриці [5]; $N_{e.д}$ - потужність електродвигуна приводу диска, через отвір якого зневоднений матеріал з накопичувача вакуумного насоса періодично скидається в контейнер збірник [5].

Потужність $N_{e.m}$ визначаємо виходячи з моменту тертя - $M_{тр.м}$ в підшипниках вала матриці [257], створюваного гідроциліндрами ГПІ при зворотно-поступальних переміщеннях вальців, а також з урахуванням передавальних відносин i і ККД елементів приводу матриці

$$N_{e.m} = \frac{M_{тр.м}}{u_{n.p}u_{p.n}\eta_{n.p}\eta_{p.n}\eta_m\eta_{n.к}} \omega_m = \frac{f_{тр}p_1 \cdot 2 \cdot F_{n.ц} d / 2}{u_{n.p}u_{p.n}\eta_{n.p}\eta_{p.n}\eta_m\eta_{n.к}} \frac{\pi \cdot n_m}{30} =$$

$$= \frac{f_{тр}p_1 F_{n.ц} d \cdot \pi \cdot n_m}{30 \cdot u_{n.p}u_{p.n}\eta_{n.p}\eta_{p.n}\eta_m\eta_{n.к}}, \quad (8.108)$$

де ω_m , n_m - кругова [рад / с] і лінійна [об / хв] частоти обертання матриці; $f_{тр}$ - зведений коефіцієнт тертя підшипників вала [257]; p_1 - максимальний тиск в порожнинах гідроциліндрів ГПІ установки (останній містить два однакові гідроциліндри), Па; $F_{n.ц}$ - площа поршня гідроциліндра, м²; d - діаметр отвору підшипника [257], мм; $u_{n.p}$, $u_{p.n}$ - передавальні числа планетарного редуктора і клинопасової передачі в приводі матриці; $\eta_{n.p}$, $\eta_{p.n}$, η_m , $\eta_{n.к}$ - ККД планетарного редуктора, клинопасової передачі, пружної муфти та підшипників кочення в приводі матриці.

Потужність $N_{e.в}$ знаходимо з урахуванням моменту $M_{тр.в}$ тертя в чотирьох підшипниках ковзання вальців [257], створюваного гідроциліндрами ГП

$$N_{э.в} = \frac{M_{тр.в}}{u_{н.р}\eta_{н.р}\eta_{м}\eta_{н.к}} \omega_в = \frac{4 \cdot 0,5 f_{тр} p_1 F_{н.ц} d_n \pi \cdot n_в}{u_{н.р}\eta_{н.р}\eta_{м}\eta_{н.к}} \frac{\pi \cdot n_в}{30} = \frac{f_{тр} p_1 F_{н.ц} d_n \pi \cdot n_в}{15300 \cdot u_{н.р}\eta_{н.р}\eta_{м}\eta_{н.к}}, \quad (8.109)$$

де $f_{тр}$ - коефіцієнт тертя в підшипниках [257]; d_n - діаметр підшипника, мм; $\omega_в$, $n_в$ - кругова [рад / с] і лінійна [об / хв] частоти обертання вальця, ($n_в$ відповідає n_m); $u_{н.р}$ - передавальне число планетарних редукторів в приводі вальців; $\eta_{н.р}$, η_m , $\eta_{н.к}$ - ККД планетарних редукторів, пружних муфт і підшипників ковзання в розглянутому приводі.

Методика розрахунку ефективної потужності $N_{e.в.н}$ пластинчастого вакуумного насоса [258] досить об'ємна і тому в даній статті не наводиться.

Складову $N_{e.д}$ визначаємо за моментом тертя - $M_{тр.д}$ в підшипниках вала диска, створюваного силою ваги матеріалу в накопичувачі за формулою [257]

$$N_{e.д} = \frac{M_{тр.д}}{u_{ч.р}\eta_{ч.р}\eta_{м}\eta_{н.к}} \omega_д = \frac{f_{тр} \rho_{м.о} W_{м.н} g \cdot d / 2 \pi \cdot n_д}{u_{ч.р}\eta_{ч.р}\eta_{м}\eta_{н.к}} \frac{\pi \cdot n_д}{30} = \frac{f_{тр} \rho_{м.о} W_{м.н} g \cdot d \pi \cdot n_д}{u_{ч.р}\eta_{ч.р}\eta_{м}\eta_{н.к}} \frac{\pi \cdot n_д}{15}, \quad (8.110)$$

де $\omega_д$, $n_д$ - кругова [рад / с] і лінійна [об / хв] частоти обертання диска; $\rho_{м.о}$, $W_{м.н}$ - густина та об'єм зневодненого матеріалу в накопичувачі; $u_{ч.р}$ - передавальне число черв'ячного редуктора приводу диска; $\eta_{ч.р}$, η_m , $\eta_{н.к}$ - ККД черв'ячного редуктора, пружної муфти та підшипників кочення в приводі матриці.

Для розрахунку потужності електродвигунів установок з ГП для потокового віброударного мікро-, ультра і нанофільтрування використовуємо формулу

$$N_{\phi 1(2,3)} = N_{e.ГП} + N_{e.ц.н}, \quad (8.111)$$

в якій $N_{e.ГП}$ - потужність електродвигуна ГП гідроциліндра установки, що створює в середовищі фільтрату оброблюваного матеріалу ударні хвилі напружень і деформацій [5]; $N_{e.ц.н}$ - потужність електродвигуна насоса, що забезпечує постійну циркуляцію матеріалу по каналах трубчастій керамічній фільтрувальній мембрані [5].

Складову $N_{e.ГП}$ визначаємо за формулою (8.98), а для розрахунку $N_{e.ц.н}$ використовуємо залежність

$$N_{e.ц.н} = \frac{f_m n_k n_m v_n p_n}{\eta_{н2} \eta_{e2} \eta_{м2}}, \quad (8.112)$$

де f_m - площа поперечного перерізу каналу фільтрувальної мембрани; n_k, n_m - число каналів мембрани і число мембран установки; p_n, v_n - номінальні, рекомендовані фірмою-виробником мембран тиск в середовищі фільтрату матеріалу, що циркулює по каналах мембран і середня швидкість його протікання по каналах; $\eta_{н2}, \eta_{e2}, \eta_{м2}$ - ККД насоса, електродвигуна і муфти допоміжного приводу установки.

На завершальній стадії проектування лінії розраховуємо ще один важливий показник її ефективності - енергоємність зневоднення і фільтрування - $E_{з,ф}$, при цьому використовуємо формулу

$$E_{з,ф} = T_{p.зм} n_{зм} \left(\sum_{i=1}^4 N_{з.i} + \sum_{j=1}^3 N_{ф.j} \right) / \frac{U_k - U_n}{100} m_{м.з}, \quad (8.113)$$

в якій i - кількість необхідних стадій зневоднення: $i = n_{см.з} = 2 \div 4$; j - кількість необхідних стадій фільтрування: $j = n_{см.ф} = 1 \div 3$ (див. рисунок 8.14).

ВИСНОВКИ

1. Розроблені класифікації та виконаний аналіз відомих способів та обладнання для зневоднення 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 громіздке і дороге обладнання.

2. За допомогою гідроімпульсних стендів, створених на базі вібропресів ІВПМ, експериментально доведена висока ефективність пропонованого способу віброударного зневоднення. 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.

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

4. Розроблені безінерційні реологічні моделі вологого дисперсного матеріалу під час реалізації досліджуваних процесу віброударного зневоднення. 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 вологих дисперсних матеріалів (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 матеріалу, 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 матеріалів, 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 матеріалу (кавового шламу, спиртової барди та бурякового

жому) в процесі його 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. 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 матеріалів та їх фізико-механічними характеристиками. Коректність моделей перевірена експериментально, за допомогою гідроімпульсних стендів, шляхом зіставлення відповідних розрахункових та експериментальних залежностей для процесів зневоднення 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.

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

9. 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 матеріалів, 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.

10. Розроблена конструкторська документація гідроімпульсної установки для потокового віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів, 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Панфилов В. Л. Технологические линии пищевых производств (теория технологического потока)/ Панфилов В. Л. - М.: Колос, 1993. - 288 с.
2. Азаров Б. М. Технологическое оборудование пищевых производств/ Азаров Б. М. - М.: Агропромиздат, 1988. - 463 с.
3. Шувалов В. Н. Машины-автоматы и поточные линии пищевой промышленности. Теория, конструирование, эксплуатация/ Шувалов В. Н. - Л.: Машиностроение, 1973. – 544 с.
4. Ковалевский В. И. Проектирование технологического оборудования и линий: Учеб. пособие / Ковалевский В. И. – СПб.: ГИОРД, 2007. – 320 с.
5. Севостьянов И. В. Процессы и оборудование для виброударного разделения пищевых отходов. Монография/ И. В. Севостьянов. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 417 с.
6. Курочкин А. А. Оборудование и автоматизация перерабатывающих производств / Курочкин А. А., Шабурова Г. В., Гордеев А. С., Завражнов А. И. - М.: Колос, 2007. - 591 с.
7. Васильева Е. В. Повышение эффективности использования оборудования предприятий пищевой промышленности / Е. В. Васильева, Е. И. Лебедев. - М.: Пищевая промышленность, 1979. – 260 с.
8. Saguy S. Integration of computers in food processing/ Saguy S., Levine L. Symes S. and Rotstain E. // Biotechnology and Food Processing Engineering/ Schwartzberg H. G. and Rao M. A. (eds.). – NY.: Marsel Dekker, 1990.
9. Соколов В. А. Автоматизация технологических процессов пищевой промышленности/ Соколов В. А. - М.: Агропромиздат, 1991. – 445 с.
10. Карпин Е. Б. Автоматизация технологических процессов пищевых производств/ Карпин Е. Б. - М.: Агропромиздат, 1985. – 536 с.
11. Драгилев А. И. Устройство и эксплуатация оборудования предприятий пищевой промышленности/ Драгилев А. И. - М.: Пищевая промышленность, 1979. – 304 с.
12. Стабников В. Н. Проектирование процессов и аппаратов пищевых производств/ Стабников В. Н. - К.: Вища школа, 1982. – 199 с.
13. Прейс Г. А. Повышение износостойкости оборудования пищевой промышленности/ Прейс Г. А. - М.: Машиностроение, 1979. – 208 с.
14. Соколов В. И. Основы расчета и конструирования машин и аппаратов пищевых производств/ Соколов В. И. - М.: Машиностроение, 1983. – 447 с.
15. Харламов С. В. Практикум по расчету и конструированию машин и аппаратов пищевых производств/ Харламов С. В. - Л.: Агропромиздат, 1991. – 256 с.

16. Мякшин В. Н. Борьба с шумом и вибрацией на предприятиях пищевой промышленности/ Мякшин В. Н. – К.: Техника, 1985. – 141 с.
17. Никитин В. С. Охрана труда на предприятиях пищевой промышленности/ В. С. Никитин, Ю. М. Бурашников. - М.: Агропромиздат, 1991. – 350 с.
18. Трегуб В. Г. Проектирование, монтаж и эксплуатация систем автоматизации пищевых производств/ В. Г. Трегуб, А. П. Ладанюк. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 352 с.
19. 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.
20. Славовски М. К. О механической прочности и последовательности переработки винограда/ М. К. Славовски, А. В. Иваненко // Пищевая промышленность: Респ. Межведомственный научно-технический сборник, 1975. - №21. – С. 68-71.
21. Аминов М. С. Процессы и аппараты пищевых производств/ Аминов М. С. - М.: Колос, 1999. – 504 с.
22. Дикис М. Я. Технологическое оборудование консервных заводов/ М. Я. Дикис, А. Н. Мальский. – М.: Пищевая промышленность, 1969. – 777 с.
23. Іскович-Лотоцький Р. Д. Розрахунок параметрів вібропресового обладнання з гідроімпульсним приводом для зневоднення вторинних продуктів переробних та харчових виробництв/ Р. Д. Іскович-Лотоцький, І. В. Севостьянов // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2007. - №3. – Ч. 1. – С. 105 – 108.
24. Горбатюк В. И. Процессы и аппараты пищевых производств/ Горбатюк В. И. - М.: Колос, 1999. – 335 с.
25. ООО «Гидроматик»/ Ленточный пресс-фильтр L – SBP [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://hydromatic.ru/.php/>.
26. Драгилев А. И. Технологические машины и аппараты пищевых производств/ А. И. Драгилев, В. С. Дроздов. – М.: Колос, 1999. – 376 с.
27. Кавецкий Г. Д. Процессы и аппараты пищевой технологии/ Г. Д. Кавецкий, Б. В. Васильев. - М.: Колос, 1999. – 551 с.
28. Космодемьянский Ю. В. Процессы и аппараты пищевых производств/ Космодемьянский Ю. В. - М.: Колос, 1997. – 208 с.
29. Назаров Н. И. Общая технология пищевых производств/ Назаров Н. И., Гинзбург А. С., Гребенюк С. М. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 360 с.
30. Стабников В. Н. Процессы и аппараты пищевых производств/ Стабников В. Н. - М.: Агропромиздат, 1985. – 503 с.

31. Казаков К. В. Разработка энергосберегающей технологии сушки свекловичного жома с исследованием параметров шнекового пресса: дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / К. В. Казаков. - Белгород, 2002. - 156 с.
32. Липатов Н. Н. Процессы и аппараты пищевых производств/ Липатов Н. Н. - М.: Экономика, 1987. – 272 с.
33. Ковальская Л. П. Технология пищевых производств / Ковальская Л. П. - М.: Колос, 1999. – 752 с.
34. Соколов А. Я. Прессы пищевых и кормовых производств/ Соколов А. Я. – М.: Машиностроение, 1973. – 288 с.
35. Караулов Н. Е. Исследование процесса прессования обогащенного свекловичного жома и разработка оборудования для его производства: дис. канд. техн. наук: 05.18.12 / Н. Е. Караулов. - Воронеж, 1981. - 324 с.
36. Караулов Н. Е. Производство амидо - минерального жома/ Караулов Н. Е., Парфенопуло М. Г., Скриплев В. Е. - М.: ЦНИИТЭИ Пищепром, 1978. - 38 с.
37. Кожарова Л. С. Основы комбикормового производства/ Кожарова Л. С. - М.: Агропромиздат, 1987. – 134 с.
38. Жислин Я. М., Пикус Б. И. Дробильное и прессующее оборудование комбикормового завода/ Я. М. Жислин, Б. И. Пикус. - М.: Агропромиздат, 1987. – 118 с.
39. Соколов А. Я. Комбикормовые заводы/ Соколов А. Я. - М.: Колос, 1970. – 431 с.
40. Антипов С. Т. Машины и аппараты пищевых производств. В 2 кн. Кн. 1/ Антипов С. Т., Кретов И. Т., Остриков А. Н.; Под ред. В. А. Панфилова. – М.: Высш. шк., 2001. – 703 с.
41. Зигелер Г. Принципы декантерной технологии/ Зигелер Г. // Учебный материал по декантерной технологии. Изучение продукции. – Коммерческая служба отделения технологии сепарации. – 94 с.
42. Назаров Н. И. Технология и оборудование пищевых производств/ Назаров Н. И. - М.: Пищевая промышленность, 1977. – 350 с.
43. Гончаревич И. Ф. Вибрационная техника в пищевой промышленности/ Гончаревич И. Ф., Урьев И. Б., Талейсник М. А. – М.: Пищевая промышленность, 1977. – 279 с.
44. Rao M. A. Rheology of liquid foods/ Rao M. A.// J. Texture Studies, 1971, №8, P. 135 – 168.
45. Федоткин И. М. Физико-математические основы интенсификации процессов и аппаратов пищевой и химической технологии/ Федоткин И. М. - Кичнев.: Штиинца, 1987. – 262 с.
46. Быховский И. И. Основы теории вибрационной техники/ Быховский И. И. - М.: Машгиз, 1969. - 363 с.

47. Овчинников П. Ф. К теории вибрационных машин с учетом свойств перерабатываемых сред/ Овчинников П. Ф.: автореф. дис. ... доктора техн. наук.: 05.18.12 – К., 1969. – 47 с.
48. Десов А. Е. Вибрированный бетон/ Десов А. Е. - М.: Госстройиздат, 1956. - 229 с.
49. Михайлов Н. В. Основные принципы новой технологии бетона и железобетона/ Михайлов Н. В. - М.: Стройиздат, 1961. - 53 с.
50. Урьев И. Б. Физико-химическая механика в технологии дисперсных систем/ Урьев И. Б. - М.: «Знание», 1975. - 65 с.
51. Урьев И. Б. Физико-химические основы интенсификации технологических процессов в дисперсных системах/ Урьев И. Б. - М.: «Знание», 1980. - 64 с.
52. Буренков Н. А. Интенсификация технологических процессов в пищевой промышленности при помощи низкочастотных колебаний / Буренков Н. А. – К.: Техніка, 1969. - 194 с.
53. Гончаревич И. Ф. Теория вибрационной техники и технологии / И. Ф. Гончаревич, К. В. Фролов. - М.: Наука, 1981. - 219 с.
54. Лимонов Г. Е. Научные основы интенсификации и оптимизации тепломассообменных процессов мясной промышленности с использованием вибрации: дис.... доктора техн. наук: 05.18.12 / Лимонов Генрих Евсеевич — М., 1990. - 359 с.
55. Гончаревич И. Ф. Вибрационные грохоты и конвейеры/ Гончаревич И. Ф., Земсков В. Д., Корешков В. И. – М.: Госгортехнадзор, 1960. – 253 с.
56. Гортинский В. В. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях/ Гортинский В. В., Демский А. Б., Борискин М. А. – М.: Колос, 1973. – 295 с.
57. Ковалев Н. Г. Уборка и утилизация навоза на фермах КРС/ Ковалев Н. Г. - М.: Россельхозиздат, 1981.
58. Унгурян М. А. Интенсификация процесса обезвоживания и брикетирования свекловичного жома: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12/ Унгурян Мирча Алексеевич. – М., 1983, - 217 с.
59. Асейнов С. А. Вибрационные машины в рыбной промышленности/ Асейнов С. А., Декин К. Д., Медведик И. В., Терентьев А. В. - М.: Пищевая промышленность, 1974. – 97 с.
60. Блехман И. И. Вибрационное перемещение/ И. И. Блехман, Г. Ю. Дженалидзе. – М.: Наука, 1964. – 410 с.
61. Лимонов Г. Е. Применение вибрации для интенсификации посола измельченного мяса/ Лимонов Г. Е., Шишлина Н. В., Заславский Е. К.// Мясная индустрия СССР, 1977. - № 7. – С. 38 - 41.
62. Парфенопуло М. Г. Зависимость степени виброуплотнения сухого свекловичного жома от амплитуды и частоты колебаний / М. Г.

Парфенопуло, Н. Е. Караулов // Известия вузов СССР. Серия пищевая технология, 1975. - № 1. - С. 105-107.

63. Урьев Н. Б. Физико-химическая механика и интенсификация образования пищевых масс / Н. Б. Урьев, М. А. Талейсник. - М. : Пищевая промышленность, 1976. - 239 с.

64. Іскович-Лотоцький Р. Д. Основи теорії розрахунку та розробка процесів і обладнання для віброударного пресування/ Іскович-Лотоцький Р. Д. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2006. – 338 с.

65. Іскович-Лотоцький Р. Д. Машины вибрационного и виброударного действия/ Іскович-Лотоцький Р. Д., Матвеев И. Б., Крат В. А. - Киев: Техніка, 1982. - 208 с.

66. Пат. 12381А, Україна, 6. МПК В21J/06. Гідроімпульсний вібропрес-молот / Р. Р. Обертюх, Р. Д. Іскович-Лотоцький, І. В. Севостьянов, Д. М. Климчук (Україна). –№94097041; Заявл. 23.09.94; Опубл. 02.12.96, Бюл. №1. – С. 54.

67. Пат. 21594 А, Україна МПК⁶ В 21 J 9/06. Стенд з гідроімпульсним приводом для відпрацювання режимів вібропресування/ Р. Д. Іскович-Лотоцький, Р. Р. Обертюх, І. В. Севостьянов, Ю. В. Булига (Україна). - №95083732; Заявлено 08.08.95; Опубл. 06.01.98, Бюл. №2.

68. Іскович-Лотоцький Р. Д. Вібропресова машина для обезводнювання матеріалів харчових виробництв/ Іскович-Лотоцький Р. Д., Севостьянов І. В., Андрощук В. Д. // Вибрації в техніці та технологіях, 2002. - №3 (24). - С. 48 - 50.

69. Іскович-Лотоцький Р. Д. Гідрофіковані прес-форми для багатокомпонентного віброударного інерційного навантаження дисперсних мас/ Р. Д. Іскович-Лотоцький, І. В. Севост'янов // Наукові нотатки. Межвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»), 2004. – Випуск 14 (травень). – С. 107 – 116.

70. 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.

71. 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.

72. Пат. 12377 А, Україна, 6. МПК F15B 21/12. Генератор імпульсів тиску / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Р. Р. Обертюх, І. В. Севостьянов, Д. М. Климчук (Україна). - № 94097057/; Заявл. 26.09.94; Опубл.02.12.96, Бюл. №1 – С.49.

73. Пат. 20199 А, Україна, МПК⁶ В 21 J 9/06. Система керування гідроімпульсним приводом трьохкоординатної технологічної машини/ Р.

Д. Искович-Лотоцкий, Р. Р. Обертюх, І. В. Севост'янов (Україна). - №94022822; Заявл. 07.02.94; Опубл. 25.12.97, Бюл. №6.

74. Искович-Лотоцкий Р. Д. Гидроимпульсный привод // Искович-Лотоцкий Р. Д., Матвеев И. Б., Обертюх Р. Р. и др. // Гидропривод и гидропневмоавтоматика: Респ. межвед. сб. / МВ и ССО УССР. - Вып. 18. - Киев: Техніка, 1982. - С. 56 - 60.

75. Трегуб В. Г. Проектирование, монтаж и эксплуатация систем автоматизации пищевых производств/ В. Г. Трегуб, А. П. Ладанюк. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. - 352 с.

76. Чмых О. В. Виброимпульсное формование карбидокремниевых изделий: дис . . . канд. техн. наук: 05. 17. 11/ Чмых О. В. - Киев, 1985. - 178 с.

77. Ветошкин А. Г. Технология защиты окружающей среды (теоретические основы). Учебное пособие/ А. Г. Ветошкин, К. Р. Таранцева. - Пенза: Изд-во Пенз. технол. ин-та, 2004. - 249 с.

78. Рогов И. А. Физические методы обработки пищевых производств/ И. А. Рогов, А. В. Горбатов. - М.: Пищевая промышленность, 1976. - 583 с.

79. Эфендиев О. Ф. Электроочистка жидкостей в пищевой промышленности/ О. Ф. Эфендиев, В. И. Чижииков. - М.: Пищевая промышленность, 1977. - 150 с.

80. Sokhansanj S. Drying of foodstuffs/ S. Sokhansanj, D. S. Jayas // Handbook of Industrial Dry Mujumdar, A. S., (ed.). - NY: Marcel Dekker, 1987, P. 517 - 554.

81. Strumillo C. Energy aspects in drying/ C. Strumillo, C. Lopez-Cacicedo// Handbook of Indu-Drying Mujumdar, A. S. (ed.). - NY: Marcel Dekker, 1987, P. 823 - 862.

82. Антипов С. Т. Машины и аппараты пищевых производств. В 2 кн. Кн. 2/ С. Т. Антипов, И. Т. Кретов, А. Н. Остриков; Под ред. В. А. Панфилова. - М.: Высш. шк., 2001. - 680 с.

83. Агентство научно-технической информации Научно-техническая библиотека (Свид. ФС77-20137 от 23.11.2004)/ Технология низкотемпературного обезвоживания в вакууме [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/576.html> .

84. Аккорси А. Полупромышленная установка для высушивания жома паром низкого давления / А. Аккорси, Ф. Зама // Сахарная промышленность, 1996. - № 3. - С. 25.

85. Кретов И. Т. Разработка устройства для сушки свекловичного жома/ Кретов И. Т., Шахов В. Д., Дранников А. В., Прибытков А. В. // Хранение и переработка сельхозсырья, 2001. - № 10. - С. - 56 - 57.

86. Кретов И. Т. Интенсификация процесса сушки овощей и круп/ Кретов И. Т., Кравченко В. М., Остриков А. Н., Назаров А. О. - М.: ЦНИИТЭИ пищепром, 1986. - Сер. 18, вып. 11. - 25 с.

87. Орлов В. Д. Интенсификация процессов жомосушильного производства и перспективы его развития / Орлов В. Д., Заборсин А. Ф., Иваницкая Л. Г., Позняк А. А., и др. - М. : АгроНИИТЭИГШ, 1990. - Вып. 11. - 24 с.
88. Van't Land C. M. Industrial Drying Equipment/ Van't Land C. M. - NY: Marcel Dekker, 1991.
89. Keey R. B. Drying: Principles and Practice/ Keey R. B.. – NY.: Pergamon Press, 1972.
90. Van Arsdel W. B. Food Dehydration/ Van Arsdel W. B., Copley M. J., Morgan A. I. - 2nd ed. - Westn CT: AVI Publishing, 1973.
91. Остриков А. Н. Развитие научных основ и разработка способов тепловой обработки пищевого растительного сырья с использованием перегретого пара: дис. . . . доктора техн. наук: 05.18.12 / Остриков А. Н. - Воронеж, 1993. - 410 с.
92. Петров И. К. Технологическое измерения и приборы в пищевой промышленности: Учебник для вузов. -2-е изд., перераб. и доп./ Петров И. К. - М.: Агропромиздат, 1985. – 344 с.
93. Соколов В. А. Основы автоматизации технологических процессов пищевых производств / В. А. Соколов. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. – 400 с.
94. Орлов В. Д. Исследование процесса сушки свекловичного жома глубокого прессования: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Орлов В. Д. - Киев, 1978. - 208 с.
95. Сажин Б. П. Основы техники сушки/ Сажин Б. П. - М. : Химия, 1984. - 315 с.
96. Романков П. Г. Сушка во взвешенном состоянии/ П. Г. Романков, Н. Б. Рашковская. - Л.: «Химия», 1968. - 357 с.
97. Кремнев О. А. Скоростная сушка/ Кремнев О. А. – К.: Гостехиздат УССР, 1963. - 381 с.
98. Бачурин П. Я. Оборудование для производства спирта и спиртпродуктов/ П. Я. Бачурин, Б. А. Устинников, 1985. – 343 с.
99. Лыков А. В. Тепломассообмен/ Лыков А. В. - М.: Энергия, 1978. - 479 с.
100. Орлов В. Д. Производство сушеного свекловичного жома / Орлов В. Д., Заборсин А. Ф., Яровой Л. П. - М. : Легкая и пищевая промышленность, 1983. -112 с.
101. Старчеус В. П. Исследование процесса сушки семян подсолнечника в виброкипящем слое: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Старчеус В. П. - Воронеж, 1974. - 235 с.
102. Яровой С. Л. Интенсификация процесса сушки свекловичного жома и создание жомосушильной установки: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / Яровой С. Л. - Киев, 1987. - 284 с.

103. Дранников А. В. Исследование процесса сушки свекловичного жома перегретым паром: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12/ Дранников Алексей Викторович. - Воронеж, 2003. - 182 с.
104. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии/ Касаткин А. Г. - М.: «Химия», 1973. - 752 с.
105. Туровский И. С. Обработка осадков сточных вод/ Туровский И. С. – 3-е изд. М.: Стройиздат, 1985. – 256 с.
106. Яковлев С. В. Обработка и утилизация осадков производственных сточных вод/ Яковлев С. В., Волков Л. С., Воронов Ю. В., Волков В. Л. – М.: Химия, 1999. – 448 с.
107. Гребенюк С. М. Расчёт и конструирование экстракторов пищевой промышленности /Гребенюк С. М. - М.: Колос, 1976. – 62 с.
108. Николаев Г. И. Лабораторный практикум по курсу "Процессы и аппараты"/ Николаев Г. И., Блекус В. Г., Ухеев Г. Ж.: Учебное пособие. - Улан-Удэ: ИПЦ ВСГТУ, 2001. – 61 с.
109. Аткинсон Б. Биохимические реакторы/ Аткинсон Б. - М.: Пищевая промышленность, 1979. – 280 с.
110. Солнцев Ю. П. Оборудование пищевых производств. Материаловедение: Учеб. для вузов/ Солнцев Ю. П., Жавнер В. Л., Вологжаника С. А., Горлач Р. В. - СПб.: Изд-во «Профессия», 2003. - 526 с.
111. Сравнение технологий переработки барды/[Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.spbarda.ru/pages/compare> .
112. Разладин Ю. С. Использование вторичных энергоресурсов в пищевой промышленности/ Разладин Ю. С. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 232 с.
113. Воробьев О. Г. Инженерная защита окружающей среды: Учебное пособие/ Воробьев О. Г. – СПб.: Изд. "Лань", 2002. – 288 с.
114. Толстогузов В. Б. Новые формы белковой пищи/ Толстогузов В. Б. - М.: Агропромиздат, 1987. – 303 с.
115. Мачихин Ю. А. Инженерная реология пищевых материалов/ Ю. А. Мачихин, А. В. Максимов. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. - 212 с.
116. Krieger I. M. Rheology of emulsions and dispersions/ Krieger I. M. //Physical Properties of Foods. – Peleg M. and Bagley E. B. – Westport, CT: AVI Publishing, 1983.
117. Гарус А. А. Математическое моделирование процесса отжима масличного материала в шнековых прессах: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / Гарус Алексей Алексеевич. - Краснодар, 2000. - 217 с.
118. Бабенко Д. С. Разработка способа обезвоживания свекловичного жома методом прессования в поле вибрационного воздействия: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / Бабенко Денис Сергеевич. - Воронеж, 2009. - 165 с.

119. Искович-Лотоцкий Р. Д. Основы теории расчета и разработка процессов и оборудования для виброударного прессования заготовок изделий из порошковых материалов: дис. . . . докт. техн. наук: 05. 03. 05/ Искович-Лотоцкий Ростислав Дмитриевич. - М., 1986. - 509 с.
120. Библик Е. Е. Реология дисперсных систем/ Библик Е. Е. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. – 172 с.
121. Гучков К. П. Реология пищевых масс/ Гучков К. П., Мачихин Ю. А., Мачихин С. А., Лунин Л. Н. – М.: Пищевая промышленность, 1970. – 208 с.
122. Покровский В. Н. Статистическая механика разбавленных суспензий/ Покровский В. Н. – М.: Наука, 1978. – 136 с.
123. Heldman D. R. Food Process Engineering/ D. R. Heldman, R. P. Singh. – Westport, CT: AVI Publishing, 1981.
124. Ребиндер П. А. Физико-химические основы пищевых производств/ Ребиндер П. А. – М.: Химия, 1952. – 320 с.
125. Казанский М. Ф. Анализ форм связи и состояния влаги, поглощенной дисперсным телом с помощью кинетических кривых сушки/ Казанский М. Ф. – «ДАН СССР», 1960. - №5.
126. Берлинер М. А. Измерения влажности/ Берлинер М. А. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.
127. Федоткин И. М. Физико-технические основы влагометрии в пищевой промышленности/ И. М. Федоткин, В. П. Ключков. – К.: Техніка, 1974. – 320 с.
128. Sherman P. Food Texture and Rheology/ Sherman P. – NY.: Academic Press, 1979.
129. Азаров Б. М. Реология пищевых масс / Б. М. Азаров, Н. И. Назаров. - М.: МТИПП, 1970. – 90 с.
130. Кузнецов О. А. Реология пищевых масс: Учебное пособие/ Кузнецов О. А., Волошин Е. В., Сагитов Р. Ф. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. - 106 с.
131. Азаров Б. М. Формование давлением изделий пищевой промышленности: автореф. дис. ... доктора техн. наук: 05.18.12 / Азаров Борис Михайлович. - М., 1972. - 44 с.
132. Bistany K. L. Dynamic viscoelastic properties of foods in texture control/ K. L. Bistany, J. L. Kokini // J. Rheol, 1983, №27, P. 605 – 620.
133. Jowitt R. Physical Properties of Foods. 1 and 2./ Jowitt R., Esehер F., Kent M. McKenna R., Rognes M. – [S. L.] Elsevier Applied Science Publishers, 1983.
134. Ofoli R. Y. A generalized rheological model for inelastic fluid foods/ Ofoli R. Y., Morgan R. G., Steffe J. F. //J. Texture Stud, 1987, № 18, P. 213 - 230.
135. Steffe J. F. Rheological Methods in Food Process Engineering/ Steffe J. F. - East Lansing, MI: Freeman Press, 1992.

136. Harper J. C. Elements of Food Engineering/ Harper J. C. – Davis. California: University of California, 1972.
137. Ross-Murphy S. B. Rheological methods/ Ross-Murphy S. B.// Biophysical Methods in Food Research. – London: Blackwell Scientific, 1984.
138. Shoemaker C. F. Time-dependent rheological behavior of foods/ Shoemaker C. F., Figoni P. I. // Foods Technol., 1984, №38, P. 110 – 112.
139. Урьев Н. Б. Пищевые дисперсные системы/ Н. Б. Урьев, М. А. Талейсник. - М.: Агропромиздат, 1985. – 296 с.
140. Матц С. А. Структура и консистенция пищевых продуктов/ Матц С. А. – М.: Пищевая промышленность, 1972. – 237 с.
141. Машины для механизации животноводческих ферм. Теория и расчет. Тема 11. Механизация гранулирования и брикетирования кормов [Электронный ресурс] Режим доступа: http://batu.edu.by/tmg_MGF_lect11.html#books.
142. Азаров Б. М. Инженерная реология пищевых производств/ Б. М. Азаров, В. А. Арет. – М.: МТИПП, 1978. – 112 с.
143. Крючков И. В. Основные закономерности непрерывного извлечения плодовых соков и разработка оборудования для поточных линий/ Крючков И. В. - Автореф. докт. дис. - М.: МТИПП, 1978. - 37 с.
144. Горбатов А. В. Реология мясных и молочных продуктов/ Горбатов А. В. - М.: Пищевая промышленность, 1979. – 383 с.
145. Лыков А. В. Теория сушки/ Лыков А. В. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
146. Воюцкий С. С. Курс коллоидной химии/ Воюцкий С. С. – М.: Химия, 1964. – 574 с.
147. Ивлев Д. Д. Теория упрочняющегося пластического тела / Д. Д. Ивлев, Г. И. Быковцев. - М.: Физматгиз, 1971. - 232 с.
148. Горбатов А. В. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов/ Горбатов А. В., Маслов А. М., Мачихин Ю. А. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 296 с.
149. Николаев Б. А. Структурно-механические свойства мучного теста/ Николаев Б. А. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 245 с.
150. Rand W. M. Development and analysis of empirical mathematical kinetic models pertinent to food processing and storage/ Rand W. M.// Computer-aided Technique in Food Technology. Saguy I. (ed.). – NY.: Marcel Dekker, 1983, P. 71 – 90.
151. Бертенев Г. М. К теории реологических свойств дисперсных систем/ Бертенев Г. М.// В кн. Физико-химическая механика дисперсных структур. – М.: Наука, 1966. – С. 371 – 383.
152. Знаменский Г. М. Гидравлические и тепловые процессы пищевых производств/ Знаменский Г. М. - М.: Пищевая промышленность, 1975. – 255 с.

153. Гинзбург А. С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов/ Гинзбург А. С. - М.: Агропромиздат, 1990. – 287 с.
154. Kokini J. L. Rheological properties of foods/ Kokini J. L. // Handbook of Food Engineering/ Heldman D. R. and Lund D. B. (eds.). – NY.: Marcel Dekker, 1992, P. 1 – 39.
155. Девидсон И. Псевдооживление твердых частиц/ И. Девидсон, Д. Харрисон. – М.: Химия, 1965. – 184 с.
156. Bistany K. L. Comparison of steady shear rheological properties and small amplitude dynamic viscoelastic properties of fluid food materials/ K. L. Bistany, J. L. Kokini // J. Texture Studies, 1983, №14, P. 113 – 124.
157. Калиновская О. П. Разработка вибрационных установок для сушки и охлаждения продуктов в пищевой и смежных отраслях промышленности: дис. ... доктора техн. наук: 05.18.12 / Калиновская Ольга Петровна. - Львов, 1984. - 351 с.
158. Назаров А. Б. Исследование процесса сушки вареных круп в виброкипящем слое при комбинированных способах теплоподвода: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / А. Б. Назаров. - Воронеж, 1976. - 201 с.
159. Михайлов Ю. А. Тепло- и массоперенос/ Михайлов Ю. А.. - Минск: Энергия, 1972. - 456 с.
160. Калиновская О. П. Опыт использования вибрационных сушилок в комбикормовой промышленности/ Калиновская О. П., Лабай В. И., Денисов П. Д. - М.: ЦНИИТЭИ Минзага СССР (Сер. Комбикормовая промышленность), 1977. - 36 с.
161. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики/ А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М.: Наука, 1966. – 724 с.
162. Пейн Г. Физика колебаний и волн/ Пейн Г. – М.: Мир, 1979. – 390 с.
163. Файкин В. И. О влиянии пригруза при виброформовании изделий из порошковых материалов/ Файкин В. И., Петров Г. Н., Волошин-Челпан Э. К. //Уч. записки Моск. ин-та тонкой хим. технол, 1970. – №2. – С. 202–207.
164. Иванов М. Н. Детали машин: Учеб. для студентов высш. техн. учеб. Заведений/ Иванов М. Н. – М.: Высш. шк., 1991. – 383 с.
165. 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.
166. 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.
167. Севостьянов І. В. Визначення робочих параметрів процесів віброударного сепарування вологих дисперсних матеріалів/ І. В.

Севостьянов, Р. Д. Іскович-Лотоцький // Наукові нотатки, 2008. – Випуск 23. – С. 282 – 292.

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

169. Куприянов Б. В. Технологические измерения и КИП в пищевой промышленности/ Куприянов Б. В. - М.: Пищевая промышленность, 1977. – 279 с.

170. Грачев Ю. П. Математические методы планирования экспериментов / Грачев Ю. П. - М. : Пищевая промышленность, 1979. - 199 с.

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

172. Ветров В. А. Разработка энергосберегающей безотходной технологии сушки свекловичного жома с обоснованием параметров сушильной установки: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01/ Ветров Виталий Александрович. - Белгород, 2007. - 168 с.

173. Гинзбург А. С. Технология сушки пищевых продуктов/ Гинзбург А. С. - М.: Пищевая промышленность, 1976. – 250 с.

174. 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.

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

176. Пат. 68777 У, Україна, МПК В01D 39/10: Гідроімпульсне сито/ Севостьянов І. В., Іскович-Лотоцький Р. Д., Любин С. В. (Україна). – № u2011 11382; Заявл. 26.09.2011; Опубл. 10.04.2012. Бюл. №7, 2012 р.

177. 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.

178. Петров В. И. Основы проектирования предприятия пищевой промышленности. Учебное пособие/ В. И. Петров. – Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2003. – 120 с.

179. Ям В. М. Реологические основы виброуплотнения упруго-вязко-пластичных сред / Ям В. М., Солодовник А. Б., Йохансон Р. Ф. и др. // Производство огнеупоров, 1975. - №4 (47). - С.102-115.
180. Ям В. М. Реологические основы виброуплотнения упруго-вязко-пластичных сред / Ям В. М., Солодовник А. Б., Йохансон Р. Ф. и др. // Производство огнеупоров, 1975. - №5 (48). - С. 75-87.
181. Тищенко Г. П. Повышение долговечности пищевого оборудования/ Г. П. Тищенко, А. Н. Трофимович - М.: Агропромиздат, 1985. – 208 с.
182. Зайцев Н. В. Ремонт и монтаж оборудования предприятий пищевой промышленности/ Зайцев Н. В. - М.: Пищевая промышленность, 1972. – 351 с.
183. Супрунчук В. К. Конструкционные материалы и покрытия в продовольственном машиностроении/ В. К. Супрунчук, Э. В. Островский. - М.: Машиностроение, 1984. – 328 с.
184. Сегеда Д. Г. Охрана труда в пищевой промышленности/ Д. Г. Сегеда, В. И. Дашевский. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. – 344 с.
185. Ивашин Г. В. Монтаж, наладка и эксплуатация автоматических устройств в пищевой промышленности/ Г. В. Ивашин, К. Ф. Никитенко. - М.: Пищевая промышленность, 1977. – 184 с.
186. Garcia E. J. Review of friction factor equations for non-Newtonian fluids in pipe flow. Special Report / E. J. Garcia, J. F. Steffe/ Department of Agricultural Engineering. - MI: Michigan State University, East Lansing, 1986.
187. 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.
188. Кузьмичев В. Е. Законы и формулы физики/ Кузьмичев В. Е. – Киев: Наук. думка, 1989. – 864 с.
189. Алексеев Е. Л. Моделирование и оптимизация технологических процессов в пищевой промышленности/ Е. Л. Алексеев, В. Ф. Пахомов. – М.: ВО Агропромиздат, 1987. – 272 с.
190. 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.
191. 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.
192. Артюшков Л. С. Динамика неньютоновских жидкостей/

Артюшков Л. С. - СПб.: Изд-во Санкт-Петерб. гос. морского техн. ун-та, 1997. – 460 с.

193. 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»: Материалы конференции. – Ч. 2. – Киев, 2012. – С. 15– 16.

194. Иванов М. Е. Специальная аппаратура управления короткоходовыми возвратно-поступательными и вращательными перемещениями/ Иванов М. Е., Искович-Лотоцкий Р. Д., Коц И. В.. - М.: НИИМаш, 1982. - 52 с.

195. Башта Т. М. Машиностроительная гидравлика/ Башта Т. М. - М.: Машиностроение, 1971. - 672 с.

196. Абрамов Е. И. Элементы гидропривода: Справочник/ Абрамов Е. И., Колесниченко К. А., Маслов В. Т. – К.: Техніка, 1977. – 320 с.

197. Пановко Я. Г. Введение в теорию механического удара/ Пановко Я. Г. - М.: Наука, 1977. – 224 с.

198. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям/ Под ред. М. О. Штейнберга. - М.: Машиностроение, 1992.- 672 с.

199. Матвеев И. Б. Гидравлический вибропресс-молот для порошковой металлургии/ И. Б. Матвеев, Р. Д. Искович-Лотоцкий // Кузнечно-штамповочное производство, 1976. - №3. - С.25-28.

200. 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.

201. Бочаров Ю. А. Основы общей теории гидравлических кузнечно-штамповочных машин/ Бочаров Ю. А. // Машины и технология обработки металлов давлением. Тр. МВТУ; №335. - М., 1980. - С. 12 - 40.

202. Чупраков Ю. И. Гидропривод и средства гидроавтоматики/ Чупраков Ю. И. - М.: Машиностроение, 1979. - 232 с.

203. Искович-Лотоцкий Р. Д. Вибрационные прессы: Обзор/ Р. Д. Искович-Лотоцкий, И. Б. Матвеев. - М.: НИИМаш, 1979. – 50 с.

204. Гавриленко Б. А. Гидравлический привод/ Гавриленко Б. А., Минин В. А., Рождественский С. Н. - М.: Машиностроение, 1968. - 502 с.

205. Чугаев Р. Р. Гидравлика: Учебник для вузов/ Чугаев Р. Р. - 4-е изд., доп. и перераб. - Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. - 672 с.

206. 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. - Т.1. - С. 50 - 57.

207. Спасский М. Р. Модель вибрационно-уплотняемой дисперсной среды/ М. Р. Спасский, Е. Д. Щукин // Коллоидный журнал, 1970. - №35. - С. 897 - 905.

208. Бидерман В. Л. Прикладная теория механических колебаний/ Бидерман В. Л. - М.: Высшая школа, 1972. - 416 с.

209. Шушкевич В. А. Основы электротензометрии/ Шушкевич В. А. - Минск.: Высшейша школа, 1975. - 352 с.

210. Тиль Р. Электрические измерения неэлектрических величин/ Тиль Р. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 192 с.

211. Датчик силы EMS70 высокоточный/ [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.elcompribor.ru/Kraftmessdosen-6427> .

212. Хоровиц П. Искусство схемотехники/ П. Хоровиц, У. Хилл В 3-х томах: Т. 2. Пер. с англ. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Мир, 1993. – 371 с.

213. Вольфганг Р. Устройство и принципы действия аналого-цифровых преобразователей различных типов/ Вольфганг Р.// WBC GmbH. - «Компоненты и технологии». - №3, 2005/ [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.efo.ru/doc/Silabs/Silabs.pl?2089> .

214. Левшина Е. С. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи). Учебн. пособие для вузов/ Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. - Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отд- ние, 1983. - 320 с.

215. Осадчий Е. П. Проектирование датчиков для измерения механических величин/ Осадчий Е. П. - М.: Машиностроение, 1979. - 480 с.

216. Электронные динамометры ДАЦ-С (Сжатия) / [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.megaves.su/elektronnye-dinamometry-dats-s-szhatiya> .

217. Катков А. Н. Алгоритмы коррекции погрешностей тензометрических датчиков давления цифровыми вторичными преобразователями/ Катков А. Н. // Молодой ученый, 2011. - №8. Т.1. - С. 58 - 60.

218. LGraph2. Поддержка L761, L780, L783, L791, E14-140, E14-440, E-154, E20-10. Руководство пользователя. – М., 2009/ [Электронный ресурс] Режим доступа: www.platan.ru/pdf/datasheets/lcard/LGraph2_help.pdf .

219. Гуменчук А. А. Разработка конструкции и методики проектирования экспериментального вибропресса с пространственным движением рабочего стола для прессования заготовок из порошков непластичных материалов: Дис... канд. техн. наук: 05. 03. 05/ Гуменчук Александр Александрович. - М. : 1991. - 249 с.

220. Гутер Р. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта / Р. Гутер, Б. В. Овчинский. - М.: Наука, 1970. - 432 с.
221. Коваленко И. Н. Теория вероятностей и математическая статистика/ И. Н. Коваленко, А. А. Филиппова. - М.: Высшая школа, 1982. - 256 с.
222. Гевондян Т. А. Приборы для измерения и регистрации колебаний/ Т. А. Гевондян, Л. Т. Киселев. - М.: Машгиз, 1962. - 467 с.
223. Деденко Л. Т. Математическая обработка и оформление результатов экспериментов/ Л. Т. Деденко, Н. А. Керженцев. - М. : МГУ, 1977. - 111 с.
224. Perkins J. D. Advanced computational methods for process modeling and simulation/ Perkins J. D.// Engineering and Food. – Vol. 1. – Physical Properties and Process Control/ Spiess W.B.L. and Shuber H. (eds.). – London: Elsevier, 1990.
225. 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 науково-технічний збірник «Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні і приладобудуванні», 2011. – Вип. 45. - С. 346 - 353.
226. Іскович-Лотоцький Р. Д. Методика проектного розрахунку параметрів гідроімпульсного привода вібропреса/ Р. Д. Іскович-Лотоцький, І. В. Севостьянов // Вибрації в техніці та технологіях, 2003. - №5 (31). – С. 31-34.
227. Пат. 68774 U, Україна, МПК А01F 15/00: Гідроімпульсна валкова машина / Севостьянов І. В., Іскович-Лотоцький Р. Д., Любин С. В. (Україна). – № u2011 11375; Заявл. 26.09.2011; Опубл. 10.04.2012. Бюл. №7, 2012 р.
228. Пат. 69638 U, Україна, МПК А01 F15/00: Гідроімпульсна вальцюва установка/Севостьянов І. В., Іскович-Лотоцький Р. Д., Любин С. В. (Україна). – № u2011 11885; Заявл. 10.10.2011; Опубл. 10.05.2012. Бюл. №9, 2012 р.
229. Булыга Ю. В. Разработка и исследование гидроимпульсного привода установки для виброабразивной очистки крупногабаритных деталей: дис... канд. техн. наук: 05. 02. 03/ Булыга Юрий Владимирович. – Винница, 1996. - 210 с.
230. Іскович-Лотоцький Р. Д. Інерційний вібропрес-молот з возвратно –винтовим движением вібростола/ Іскович-Лотоцький Р. Д., Севостьянов І. В., Обертюх Р. Р., Полищук Л. К. // Периодический сборник научных трудов.– Одесса, 2000. – Вып. 10. – С. 55 - 57.
231. Іскович-Лотоцький Р. Д. Перспективи розвитку вібропресового обладнання з гідроімпульсним приводом для багатокomпонентного

складнопросторового навантаження/ Р. Д. Іскович-Лотоцький, І. В. Севостьянов // Вестник национального технического университета Украины «КПИ». Машиностроение, 2002. – Вып. 42. – Том 1. - С. 169 – 174.

232. Кравченко В. М. Проблемы и перспективы рациональной переработки отходов сахарной промышленности / В. М. Кравченко, Д. В. Бабенко // Вестник Воронежской государственной технологической академии, 2007. - №12. - С. 29 - 34.

233. Орлов В. Д. Использование вторичных энергоресурсов свеклосахарных заводов в производстве сушеного жома / В. Д. Орлов, А. Ф. Заборсин. - М.: АгроНИИТЭИПП, 1987. - Вып. 6. - 36 с.

234. Скурихин И. М. Химический состав пищевых продуктов. - Т.1./ Скурихин И. М. - М.: Агропромиздат, 1987. – 224 с.

235. Севостьянов І. В. Експлуатація та обслуговування машин. Навчальний посібник/ Севостьянов І. В. - Вінниця: ВНТУ, 2006. – 127 с.

236. 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.

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

238. Севостьянов І. В. Віброударне зневоднення відходів харчових виробництв / І. В. Севостьянов, А. І. Ольшевський // Промислова гідравліка та пневматика, 2014. - №3(45). - С. 85 - 92.

239. 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.

240. Севостьянов І. В. Машина для зневоднення відходів харчових виробництв / І. В. Севостьянов, А. І. Ольшевський // Науковий журнал «Молодий учений», 2014. - №7(10). - С. 14 - 17.

241. Севостьянов І. В. Розробка та дослідження установки для двокомпонентного віброударного зневоднення відходів харчових виробництв / І. В. Севостьянов, О. В. Поліщук, А. В. Слабкий // Восточно-европейский журнал передовых технологий, 2015. - №5/7(77). - С. 40 - 46.

242. Севостьянов И. В. Установка для виброударного обезвоживания отходов пищевых производств в пресс-форме [Текст]/ И. В. Севостьянов, А. В. Слабкий, А. В. Полищук, А. И. Ольшевский // Технологический аудит и резервы производства, 2015. - №4/4 (24). – С. 41 – 46. – ISSN 2226-3780.

243. Севостьянов І. В. Віброударне зневоднення відходів харчових виробництв / І. В. Севостьянов // Наукові нотатки. Межвузівський збірник (за напрямом "Інженерна механіка"), 2015. - Випуск 48. - С. 195 - 203.

244. Планирование закона торможения поршня гидроцилиндра [Електронний ресурс] Режим доступу: http://www.simumath.net/library/book.html?code=Dyn_synthesis_planning_braking_law.

245. Севостьянов І. В. Повышение энергетической эффективности виброударного обезвоживания отходов пищевых производств / І. В. Севостьянов // Промислова гідравліка та пневматика, 2015. - №3(49). - С. 69 - 76.

246. Лыков А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки [Текст] / А. В. Лыков. – М. - Л.: Государственное энергетическое издательство, 1956. – 464 с.

247. Унгурян М. А. Интенсификация процесса обезвоживания и брикетирования свекловичного жома: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 [Текст]/ Унгурян Мирча Алексеевич. – М., 1983. - 217 с.

248. Васильева Е. В. Повышение эффективности использования оборудования предприятий пищевой промышленности [Текст]/ Е. В. Васильева, Е. И. Лебедев. - М.: Пищевая промышленность, 1979. – 260 с.

249. Севостьянов І. В. Установка для багатостадійного зневоднення відходів харчових виробництв / І. В. Севостьянов, В. Л. Луцик // Вісник машинобудування та транспорту, 2017. - №1. - С. 105 - 113.

250. Севостьянов І.В. Динамічні процеси у потоку вологого дисперсного матеріалу під час його зневоднення / І. В. Севостьянов // Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Гідро- та пневмоприводи машин - сучасні досягнення та застосування». Електронне наукове видання матеріалів конференції, м. Вінниця, 2016. - Режим доступу:

http://ctam.vntu.edu.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=205:8-dinamichni-protsesi-u-potoku-vologogo-dispersnogo-materialu-pid-chas-jogo-znevodnennya-sevostyanov-i-v&catid=49&Itemid=761&lang=ua

251. Валентас К. Дж. Пищевая инженерия: справочник с примерами расчетов / Валентас К. Дж., Ротштейн Э., Сингх Р. П. – СПб.: Профессия, 2004. – 848 с.

252. Севостьянов І. В. Процеси потокового гідродинамічного фільтрування неоднородних жидких систем і обладнання для їх реалізації / І. В. Севостьянов // Енциклопедія інженера-хіміка, 2014. - №2 С. 32 - 37.

253. Севостьянов І. В. Требования безопасности и методы контроля параметров гидроимпульсного оборудования для виброударного фазового разделения неоднородных жидких систем / І. В. Севостьянов // Все материалы. Энциклопедический справочник с Приложением

"Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам", 2014. - №4. - С. 19 - 26.

254. Севостьянов И. В. Использование пружинных манометров для исследования быстропротекающих динамических процессов в среде неоднородных жидких систем / И. В. Севостьянов, Я. В. Иванчук // Все материалы. Энциклопедический справочник с Приложением "Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам", 2014. - №5. - С. 35 - 41.

255. Севостьянов И. В. Проектирование технологических линий для утилизации отходов пищевых производств / И. В. Севостьянов, А. И. Ольшевский // Вібрації в техніці та технологіях, 2014. - №1 (73). - С. 113 - 121.

256. Проектирование ленточного конвейера. Методические указания для студентов специальности 190205 «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» / А. В. Тарнопольский, Н. Е. Курносков, Л. П. Корнилаева, Ю. К. Измайлов. – Пенза : ПензГУ, 2009. – 60 с.

257. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т.: Т.2. – 8-е изд. перераб. и доп. / Под ред. И. М. Жестковой. – М. : Машиностроение, 2001. – 912 с.

258. Фролов Е. С. Механические вакуумные насосы / Е. С. Фролов, И. В. Автономова, В. И. Васильев и др. – М. : Машиностроение, 1989. – 288 с.

ДОДАТКИ

Додаток А.

Порівняння ефективності способів статичного пресування та віброударного навантаження при зневодненні вологих дисперсних матеріалів

З метою порівняння ефективності статичного пресування та віброударного інерційного навантаження було здійснено зневоднення порцій концентрату спиртової барди та пивної дробини вологістю 75% у циліндричній прес-формі закритого типу з внутрішнім діаметром 500 мм і висотою 300 мм [5, 23].

Як основне обладнання застосовувались гідравлічний двокошиковий прес 2П-41 [22] та експериментальний гідроімпульсний стенд для попереднього віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів, створений на базі вібропреса ІВПМ-16 [64] (див. рисунок 6.1).

Визначались та зіставлялись: кінцева вологість U_k зневоднених порцій (за допомогою кожного з розглянутих способів були здійснені по п'ять спробних зневоднень однакових за масою і об'ємом порцій спиртової барди та пивної дробини) [92, 172]; тривалість ΣT_3 процесу при використанні кожного з порівнюваних способів, а також максимальні вертикальні зусилля $F_{mz\Sigma max}$, створювані виконавчими елементами 2П-41 та стенду на частинках порції вологого дисперсного матеріалу під час зневоднення.

Методика визначення U_k докладно описана у пункті 2.2.4. Час ΣT_3 визначався за секундоміром. Зусилля $F_{mz\Sigma max}$ розраховувались (див. даний додаток нижче).

Вологість U_k порцій, зневоднених на статичному пресі при створенні в його гідросистемі максимально допустимого паспортною характеристикою тиску $p_{z.max} = 18$ МПа [22] була не нижчою 65% [35]. При зневодненні на експериментальному стенді з використанням оптимального режиму з $z_{1a} = 1$ мм, $\nu = 35$ Гц, $p_{z.max} = 11$ МПа, (див. пункт 2.2.4) $U_k = 55\%$.

Тривалість ΣT_3 з використанням способів статичного пресування та віброударного навантаження для досягнення найнижчої можливої U_k порцій складала відповідно 20 хв [35] і 20 – 25 с.

Максимальне зусилля $F_{mz\Sigma max}$ на пуансоні статичного преса при діаметрі плунжера його гідроциліндра $d_z = 0,3$ м та тиску в гідросистемі $p_{z.max} = 18$ МПа буде дорівнювати

$$F_{mz\Sigma max} = p_{z.max} \frac{\pi \cdot d_z^2}{4} = 18 \cdot 10^6 \frac{3,14 \cdot 0,3^2}{4} = 1271700 \text{ Н.} \quad (\text{A.1})$$

Розрахунок зусилля $F_{mz\Sigma max}$ [23] для експериментального гідроімпульсного стенду виконаємо за його конструктивними параметрами та технічною характеристикою, наведеними у таблиці 2.1.

На рисунку А. 1 представлена схема для визначення $F_{mz\Sigma max}$, на якій позначені: m_m – маса порції вологого дисперсного матеріалу (концентрату спиртової барди вологістю $U_n = 75\%$ і густиною $\rho_m = 1195 \text{ кг/м}^3$); m_I – маса нижнього виконавчого елемента стенду (вібростолу – m_6) та пов'язаних з ним деталей (плунжера гідроциліндра ГПІ – m_2 та прес-форми – $m_{n,\phi}$); m_{II} – маса верхнього виконавчого елемента, що включає маси пуансона – m_n , рухомої траверси – $m_{p,m}$ (з врахуванням маси поршня та штока допоміжного гідроциліндра) та змінних інерційних вантажів – $m_{i,\delta}$; c_y – коефіцієнт жорсткості елементів пружного повернення вібростолу; $K_{зв.а.о}$ – зведений модуль об'ємної пружності підсистеми ГПІ, що акумулює об'ємом $W_{a.o}$.

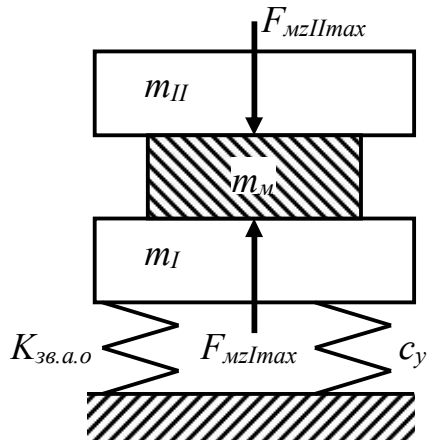


Рисунок А. 1 – Схема для розрахунку сили $F_{mz\Sigma max}$ експериментального гідроімпульсного стенду

Зусилля $F_{mz\Sigma max}$ можна наближено розрахувати за формулою (4.35) з підстановкою залежностей (4.12) – для визначення потенціальної енергії $E_{n,a}$ стискання робочої рідини та деформування стінок гідроліній у об'ємі $W_{a.o}$, (4.14) – для визначення $K_{зв.а.о}$. Також використовуються вказівки до вказаних формул підрозділу 4.2.

Значення параметрів, що входять у всі ці формули для експериментального гідроімпульсного стенду (див. рисунок 6.1 та таблицю 2.1) є такими:

$$m_I = m_6 + m_2 + m_{n,\phi} + m_m = 130 \text{ кг}; \quad m_{II} = m_n + m_{p,m} + m_{i,\delta} = 80 \div 300 \text{ кг};$$

$$c_y = 2,4 \cdot 10^6 \text{ Н/м}; \quad l_{0c} = 2,3 \text{ м}; \quad f_{0c} = 1,77 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \quad d_{0c} = 0,015 \text{ м}; \quad \delta_{0c} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$K_{0c} = \frac{K_{cm} \cdot \delta_{0c}}{d_{0c}} = \frac{2,03 \cdot 10^{11} \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}}{0,015} = 3,38 \cdot 10^{10} \text{ Па};$$

$$l_{0z.m} = 1,2 \text{ м}; \quad f_{0z.m} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \quad d_{0z.m} = 0,016 \text{ м}; \quad \delta_{0z.m} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$K_{0z.m} = \frac{K_{z.m} \cdot \delta_{0z.m}}{d_{0z.m}} = \frac{1,7 \cdot 10^9 \cdot 7 \cdot 10^{-3}}{0,016} = 7,4 \cdot 10^8 \text{ Па};$$

$$l_{z.a} = 0,71 \text{ м}; \quad f_{z.a} = 10^{-3} \text{ м}^2; \quad d_{z.a} = 0,036 \text{ м}; \quad \delta_{z.a} = 0,03 \text{ м};$$

$$K_{z.a} = \frac{K_{cm} \cdot \delta_{z.a}}{d_{z.a}} = \frac{2,03 \cdot 10^{11} \cdot 0,03}{0,036} = 1,69 \cdot 10^{11} \text{ Па};$$

$$W_a = 2,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3; d_a = 0,18 \text{ м}; \delta_a = 0,015 \text{ м};$$

$$K_a = \frac{K_{cm} \cdot \delta_a}{d_a} = \frac{2,03 \cdot 10^{11} \cdot 0,015}{0,18} = 1,69 \cdot 10^{10} \text{ Па};$$

$$p_1 = 11 \cdot 10^6 \text{ Па}; p_2 = 4 \cdot 10^6 \text{ Па}; p_0 = 101300 \text{ Па};$$

$$K_{p.a} = 1,5 \cdot 1,33 \cdot 10^9 = 1,995 \cdot 10^9 \text{ Па}; Q_{н1} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

За формулою (4.15) розраховуємо адиабатні модулі пружності робочої рідини ГП [205], з урахуванням вмісту в ній нерозчиненого повітря для тисків p_1 і p_2

$$K_{z-p.a.a1} = \frac{K_{p.p} \left(\frac{W_p}{W_z} + 1 \right)}{\frac{W_p}{W_z} + K_{p.p} \frac{p_0}{p_1^2}} = \frac{1,995 \cdot 10^9 \left(\frac{99,997}{0,003} + 1 \right)}{\frac{99,997}{0,003} + 1,995 \cdot 10^9 \frac{101300}{(11 \cdot 10^6)^2}} = 1,99 \cdot 10^9 \text{ Па};$$

$$K_{z-p.a.a2} = \frac{K_{p.p} \left(\frac{W_p}{W_z} + 1 \right)}{\frac{W_p}{W_z} + K_{p.p} \frac{p_0}{p_2^2}} = \frac{1,995 \cdot 10^9 \left(\frac{99,997}{0,003} + 1 \right)}{\frac{99,997}{0,003} + 1,995 \cdot 10^9 \frac{101300}{(4 \cdot 10^6)^2}} = 1,99 \cdot 10^9 \text{ Па}.$$

Далі обчислюється середнє значення даного модуля

$$K_{z-p.a.a.cp} = \frac{K_{z-p.a.a1} + K_{z-p.a.a2}}{2} = \frac{1,99 \cdot 10^9 + 1,99 \cdot 10^9}{2} = 1,99 \cdot 10^9 \text{ Па}.$$

Після цього визначаємо $K_{зв. а.о}$, $W_{а.о}$, $E_{н.а}$ та $F_{мз\Sigma max}$

$$K_{зв.а.о} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{z-p.a.a.cp}} + \frac{1}{K_{0c}} + \frac{1}{K_{0z.m}} + \frac{1}{K_{z.a}} + \frac{1}{K_a} \right)} =$$

$$= \frac{1}{\left(\frac{1}{1,99 \cdot 10^9} + \frac{1}{3,38 \cdot 10^{10}} + \frac{1}{7,4 \cdot 10^8} + \frac{1}{1,69 \cdot 10^{11}} + \frac{1}{1,69 \cdot 10^{10}} \right)} = 6,94 \cdot 10^8 \text{ Па};$$

$$W_{a.o} = l_{0c} \cdot f_{0c} + l_{0z.m} \cdot f_{0z.m} + l_{z.a} \cdot f_{z.a} + W_a =$$

$$= 2,3 \cdot 1,77 \cdot 10^{-4} + 1,2 \cdot 2 \cdot 10^{-4} + 0,71 \cdot 1 \cdot 10^{-3} + 2,75 \cdot 10^{-3} = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3; \text{ (A.2)}$$

$$E_{n.a} = \frac{Q_{n1} \cdot t_g (p_1 + p_2)}{2} + \frac{(p_1^2 - p_2^2) W_{a.o}}{2 \cdot K_{zв.a.o}} =$$

$$= \frac{1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} (11 \cdot 10^6 + 4 \cdot 10^6)}{2} + \frac{[(11 \cdot 10^6)^2 - (4 \cdot 10^6)^2] 4,1 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 6,94 \cdot 10^8} = 318,4 \text{ Дж};$$

$$F_{mz\Sigma \max} = m_{II} \left(\frac{\sqrt{2E_{n.a} c_y}}{m_I + m_{II}} + g \right) = 300 \left(\frac{\sqrt{2 \cdot 318,4 \cdot 2,4 \cdot 10^6}}{130 + 300} + 9,81 \right) = 30217,7 \text{ Н.}$$

Таким чином, $F_{mz\Sigma \max}$ під час реалізації пропонованого способу є у 40 разів меншим, ніж при статичному пресуванні тої самої кількості того самого матеріалу, при використанні однакової прес-форми, що обумовлює й помітно менші енергетичні витрати. Крім цього, перший спосіб забезпечує вдвічі нижчу кінцеву вологість U_k матеріалу, більшу продуктивність $\Pi_{z,p}$ за видаленою з нього рідиною ($\Pi_{z,p}$ пов'язана зворотною залежністю із ΣT_z , див. формулу (2.1)), а обладнання для його здійснення є компактнішим та легшим (маса експериментального гідроімпульсного стенду – 4 т, а 2П-41 – 9 т [22]).

Тепер розрахуємо потужність, що витрачається на зневоднення N_z під час використання кожного з порівнюваних способів. При зневодненні на статичному пресі (див. підрозділ 4.1 та формулу (4.7))

$$N_z = F_{mz\Sigma \max} v_n, \quad \text{(A.3)}$$

де v_n – середня швидкість переміщення пуансона преса; для 2П-41 $v_n = 0,005$ м/с [22]. Отже при статичному пресуванні вологих дисперсних матеріалів N_z складатиме

$$N_z = 1271700 \cdot 0,005 = 6358,5 \text{ Вт.}$$

Потужність N_z , що витрачається на реалізацію процесу під час віброударного зневоднення розраховуємо за формулами (4.7, 4.8). При цьому максимальна швидкість v_{In} вібростолу стенду, з врахуванням його прискорення $a_f = 10 \cdot g$ [64] та амплітуди коливань $z_{Ia} = 2$ мм буде дорівнювати

$$v_{In} = \sqrt{2 \cdot a_I z_{Ia}} = \sqrt{2 \cdot 10 \cdot 9,81 \cdot 0,002} = 0,63 \text{ м/с.}$$

А потужність, яка витрачається на зневоднення згідно із формулою (А.3) буде складати

$$N_3 = 30867,5 \cdot 0,63 = 19446,5 \text{ Вт,}$$

що понад у 3 рази більше, ніж під час статичного пресування. Таким чином, при менших загальних енерговитратах під час віброударного зневоднення у порівнянні із енерговитратами на зневоднення способом статичного пресування, на реалізацію основного робочого процесу при використанні пропонованого способу витрачається значно більша потужність, що також, значною мірою обумовлює його вищу ефективність.

Додаток Б.

Розрахунок поточних зусиль, створюваних виконавчими елементами гідроімпульсного вібропреса на частинках порції вологого дисперсного матеріалу у прес-формі закритого типу під час 1-го циклу його попереднього віброударного зневоднення

Отримані в результаті розрахунку значення будуть порівнюватись у підрозділі 6.4 з відповідними експериментальними даними з метою доведення адекватності розроблених у підрозділах 4.2, 4.3 динамічних та математичних моделей реальним процесам попереднього віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів у прес-формі закритого типу і коректності прийнятих при цьому припущень [5].

Вологим дисперсним матеріалом буде концентрат кавового шламу вологістю $U_n=75\%$ (див. пункт 2.2.4). Інші параметри матеріалів, що входять до рівнянь математичної моделі (див. підрозділ 4.3) визначали за допомогою експериментальних та експериментально-розрахункових методів.

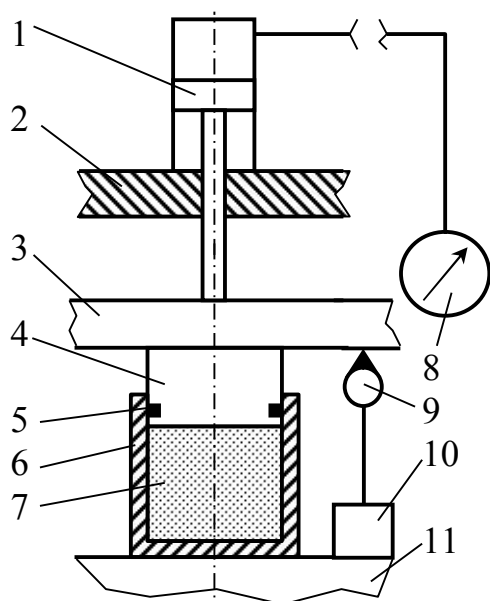


Рисунок Б.1 – Схема визначення коефіцієнтів жорсткості твердої та рідинної фаз вологого дисперсного матеріалу

якого приєднувався манометр 8. Магнітний стоек 10 з індикатором 9 устатковувались на вібростолі 11 так, щоб вимірювальний штифт індикатора дотикався і був перпендикулярним до нижньої поверхні рухомої траверси 3. Прес-форма заповнювалась висушеним концентратом кавового шламу до відмітки 170 мм. Здійснювалось трамбування шламу

Коефіцієнти жорсткості твердої - c_{mz} та рідинної - c_{pz} частинок шламу визначали на інерційному вібропрес-молоті з ГПП моделі ІВПМ-16 [64], на базі якого створювались експериментальні гідроімпульсні стенди, показані на рисунках 2.1, 6.1. Окрім вібропреса використовувались (рисунок Б.1): суцільна сталева прес-форма 6 з порожниною діаметром 130 мм і висотою 200 мм; пуансон 4 діаметром 130 мм з гумовим ущільнювачем 5; пружинний манометр 8 класу точності 1 [195], з ціною поділки 1,6 кгс/см²; індикатор 9 годинникового типу з ціною поділки $1 \cdot 10^{-5}$ м та магнітний стоек 10. Прес-форма 6 закріплювалась на вібростолі 11 вібропреса, а пуансон 4 співвісно до неї – на рухомій траверсі 3, з'єднаної зі штоком допоміжного гідроциліндра 1, до поршневої порожнини якого приєднувався манометр 8. Магнітний стоек 10 з індикатором 9 устатковувались на вібростолі 11 так, щоб вимірювальний штифт індикатора дотикався і був перпендикулярним до нижньої поверхні рухомої траверси 3. Прес-форма заповнювалась висушеним концентратом кавового шламу до відмітки 170 мм. Здійснювалось трамбування шламу

спочатку вручну, з використанням ступки, а після цього - за допомогою гідравлічного привода допоміжного гідроциліндра [64]. При цьому переливний клапан даного привода налаштовувався на максимальний тиск $p_{н.маx} = 6,3$ МПа (див. таблицю 2.1), рухома траверса опускалась у граничне нижнє положення, витримувалась на місці у продовж 10 с, піднімалась на 50 мм, через 10 с знову опускалась і так до п'яти разів [170]. Далі переливний клапан налаштовувався на тиск першої контрольної точки $p_{н1} = 1$ МПа, рухома траверса опускалась до вільного установлення пуансона на порцію шламу у прес-формі, вимірювальний штифт індикатора підводився впритул до нижньої поверхні траверси, нуль шкали індикатора суміщався зі стрілкою. Вмикався хід траверси вниз до упору, траверса витримувалась на місці 10 с, визначалось максимальне відхилення стрілки індикатора – пружна деформація твердої фази z_{m1} [92]. Описане вимірювання z_{m1} повторювалось 10 разів, після чого розраховувалось його середнє арифметичне значення. Переливний клапан налаштовувався на тиск $p_{н2} = 2$ МПа, потім $p_{н3} = 3$ МПа, $p_{н4} = 4$ МПа, $p_{н5} = 5$ МПа. У кожній контрольній точці i вимірювання $z_{m,i}$ повторювалось не менше 10 разів [172] (див. підрозділ 6.4). Коефіцієнт жорсткості $c_{mz,i}$ у кожній контрольній точці розраховувався за формулою [155]

$$c_{mz,i} = \frac{p_{н,i} S_{\delta,z}}{z_{m,i}}; i = 1 \div 5,$$

де $S_{\delta,z}$ – площа поршня допоміжного гідроциліндра 1 (див. рисунок Б.1).

Далі обчислювалось середнє арифметичне для $c_{mz,i}$ у п'яти контрольних точках. Отримане в результаті значення коефіцієнта жорсткості твердої фази концентрату кавового шламу склало $c_{mz} = 49749,4$ Н/м.

Коефіцієнт c_{pz} визначався так само, як і c_{mz} . При цьому у прес-форму 6 (див. рисунок Б.1) до висоти 170 мм наливалась порція рідинної фази кавового шламу (після її фільтрування на експериментальному гідроімпульсному стенді показаному на рисунку 2.7). Але попереднього підпресовування та ущільнення порції, як під час визначення c_{mz} не проводилось. Визначення c_{pz} здійснювалось у п'яти контрольних точках при тисках $p_{н1} = 1$ МПа, $p_{н2} = 2$ МПа, $p_{н3} = 3$ МПа, $p_{н4} = 4$ МПа, $p_{н5} = 5$ МПа з повторюванням вимірювання $z_{m,i}$ у кожній контрольній точці не менше 10 разів, визначенням середньоарифметичного $c_{pz,i}$ у кожній точці та загального середньоарифметичного c_{pz} , яке склало $c_{pz} = 163880294$ Н/м [170, 172].

Оскільки значення c_{pz} на два порядки перевищує значення c_{mz} та $c_y = 2,4 \cdot 10^6$ Н/м, при визначенні $F_{mz\Sigma}(t)$, $F_{mz\Sigma max}$ його можна не враховувати [149].

Масу $m_m = 2,143$ кг порції вологого дисперсного матеріалу у прес формі діаметром $D_m = 0,13$ м і висотою $0,2$ м (висота порції при цьому складала $H_m = 0,17$ м) визначали за допомогою електронної ваги з точністю до 1 г [92].

Густина ρ_m вологого дисперсного матеріалу – концентрату кавового шламу вологістю $U_n = 75\%$ та густина його фаз: твердої ρ_m та рідинної ρ_p при атмосферному тиску та температурі 20 °С [134] визначались також ваговим методом [140], з використанням скляної ємності з внутрішнім об'ємом $W_e = 1 \cdot 10^{-3}$ м³. Вимірювалась маса m_e порожньої ємності, далі вона заповнювалась концентратом вказаної вище вологості, знову зважувалась з визначенням маси $m_{e.m}$. Аналогічно визначалась маса ємності, заповненої висушеним концентратом – $m_{e.m}$ та фільтратом – $m_{e.p}$ [149]. Густина розраховувалась за формулами [149]

$$\rho_m = \frac{m_{e.m} - m_e}{W_e} = \frac{1,445 - 0,25}{10^{-3}} = 1195 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_m = \frac{m_{e.m} - m_e}{W_e} = \frac{0,41 - 0,25}{10^{-3}} = 162 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_p = \frac{m_{e.p} - m_e}{W_e} = \frac{1,25 - 0,25}{10^{-3}} = 1000 \text{ кг/м}^3.$$

Далі розраховувались коефіцієнти в'язкого демпфірування твердої - α_{mz} та рідинної - α_{pz} частинок. При цьому застосовувались такі формули [64]

$$\alpha_{mz} = 2 \cdot \beta \sqrt{c_{mz} m_m}; \quad \alpha_{pz} = 2 \cdot \beta \sqrt{c_{pz} m_p}, \quad (\text{Б.1})$$

в яких m_m , m_p – відповідно маса твердої та рідинної частинок; $\beta = 0,005$ [64] – відносний коефіцієнт демпфірування.

Маса m_m середньої за розмірами твердої частинки, що визначалась методом ситового аналізу [92], з врахуванням густини ρ_m . При цьому середній об'єм твердої частинки порції розраховувався за формулою (4.38) як

$$W_m = \frac{\pi \cdot d_m^3}{6} = \frac{3,14 \cdot 0,001^3}{6} = 5,23 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3,$$

де d_m – діаметр середньої за розмірами твердої частинки порції [155].

Тоді маса твердої частинки складатиме: $m_m = \rho_m \cdot W_m = 162 \cdot 5,23 \cdot 10^{-10} = 0,471 \cdot 10^{-6}$ кг.

Масу m_p визначали, виходячи із сумарного середнього об'єму $\Sigma W_{p.cer}$ рідинної фази у порції у продовж 1-го циклу віброударного навантаження та числа n_p рідинних частинок у порції, яке є приблизно у 1,5 рази більшим

за число в ній твердих частинок – n_m [134] та стабільним у продовж всього процесу зневоднення (див. підрозділ 4.3). При цьому об'єм $\Sigma W_{p.cер}$ визначаємо за виразом, одержаним з формули (4.44)

$$\begin{aligned} \Sigma W_{p.cер} = \frac{\Sigma W_{p.max} + \Sigma W_{p.min}}{2} = & \frac{\left[S_M (H_M - \Delta z_{max}) - \frac{m_M \varepsilon_M (K_M - \Delta p_{M.max})}{K_M \rho_M} \right]}{2} + \\ & + \frac{\left[S_M (H_M - \Delta z_{min}) - \frac{m_M \varepsilon_M (K_M - \Delta p_{M.min})}{K_M \rho_M} \right]}{2} = S_M H_M - \frac{S_M (z_{max} + z_{min})}{2} - \\ & - \frac{m_M \varepsilon_M}{\rho_M} + \frac{m_M \varepsilon_M (\Delta p_{M.max} + \Delta p_{M.min})}{2 \cdot K_M \rho_M}, \end{aligned} \quad (Б.2)$$

де S_M - площа поперечного перерізу порції; Δz_{max} , Δz_{min} – максимальна та мінімальна деформація порції; $\varepsilon_M = 0,25$ - масовий вміст у порції вологого дисперсного матеріалу твердої фази [140]; K_M – модуль об'ємної пружності твердої фази [140]; $\Delta p_{M.max}$ - перепад тиску створений у середовищі порції вологого дисперсного матеріалу зусиллям $F_{Mz\Sigma max}$ (див. підрозділ 4.2); $\Delta p_{M.min}$ - перепад тиску створений у порції силою тяжіння верхнього виконавчого елемента масою m_{II} (див. підрозділ 4.2).

$$\text{Площу } S_M \text{ обчислюємо як: } S_M = \frac{\pi \cdot D_M^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,13^2}{4} = 13,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Деформації Δz_{min} , Δz_{max} розраховуємо, виходячи з формул [205]

$$\frac{\Delta W_{M.min}}{W_M} = -\frac{\Delta p_{M.min}}{K_M}; \quad \frac{\Delta W_{M.max}}{W_M} = -\frac{\Delta p_{M.max}}{K_M}, \quad (Б.3)$$

де $\Delta W_{M.min} = S_M \Delta z_{min}$, $\Delta W_{M.max} = S_M \Delta z_{max}$ – мінімальна і максимальна зміна об'єму порції вологого дисперсного матеріалу, обумовлена перепадами тиску $\Delta p_{M.min} = F_{Mz\Sigma min}/S_M$; $\Delta p_{M.max} = F_{Mz\Sigma max}/S_M$;

$$W_M = S_M \cdot H_M = 13,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,17 = 2,26 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \text{ – початковий об'єм порції;}$$

K_M – модуль об'ємної пружності вологого дисперсного матеріалу [149], що визначався на інерційному вібропрес-молоті з ГПП моделі ІВПМ-16 [64], за схемою, показаною на рисунку Б.1 та послідовністю, описаною у даному додатку вище, у тих самих п'яти контрольних точках [172]. При цьому у суцільну прес-форму наливався концентрат кавового шламу вологістю $U_n = 75\%$, а далі за результатами експериментів розраховувалось

середнє арифметичне модуля K_m за допомогою залежності, отриманої з формули (Б.3) [170]

$$K_m = \frac{\Delta p_m}{\Delta W_m} W_m = \frac{p_n S_{\partial.z}}{S_m} \cdot \frac{l}{\Delta z \cdot S_m} H_m S_m = \frac{p_n S_{\partial.z} H_m}{S_m \Delta z}, \quad (\text{Б.4})$$

де p_n – контрольний тиск настройки переливного клапана вібропрес-молота, що показував манометр 8 (див. рисунок Б.1); Δz – деформація порції шламу, визначена за індикатором 9. Отримане таким чином значення K_m склало $K_m = 1522,5 \cdot 10^6$ Па.

Зусилля $F_{mz\Sigma min}$ обчислюємо як

$$F_{mz\Sigma min} = m_{II} g = 80 \cdot 9,81 = 784,8 \text{ Н.}$$

Зусилля $F_{mz\Sigma max}$ розраховувалось за формулою (А.2), в яку підставлялось значення $E_{n.a}$, розраховане у додатку А:

$$F_{mz\Sigma max} = m_{II} \left(\frac{\sqrt{2E_{n.a} c_y}}{m_I + m_{II}} + g \right) = 80 \left(\frac{\sqrt{2 \cdot 318,4 \cdot 2,4 \cdot 10^6}}{125 + 80} + 9,81 \right) = 16040,9 \text{ Н.}$$

Тоді деформації Δz_{min} , Δz_{max} визначаються як (див. формули Б.3)

$$\Delta z_{min} = \frac{F_{mz\Sigma min} H_m}{S_m K_m} = \frac{784,8 \cdot 0,17}{13,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1522,5 \cdot 10^6} = 6,56 \cdot 10^{-6} \text{ м;}$$

$$\Delta z_{max} = \frac{F_{mz\Sigma max} H_m}{S_m K_m} = \frac{16040,9 \cdot 0,17}{13,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1522,5 \cdot 10^6} = 1,34 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Модуль K_m визначався експериментально разом із c_{mz} (див. рисунок Б.1 та даний додаток вище) та за допомогою формули (Б.4). Отримане середньоарифметичне значення складало: $K_m = 5,9 \cdot 10^6$ Па.

Перепади тисків складатимуть

$$\Delta p_{m.min} = \frac{F_{mz\Sigma min}}{S_m} = \frac{784,8}{13,3 \cdot 10^{-3}} = 5,9 \cdot 10^4 \text{ Па;}$$

$$\Delta p_{m.max} = \frac{F_{mz\Sigma max}}{S_m} = \frac{16040,9}{13,3 \cdot 10^{-3}} = 1,2 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Підставляючи визначені вище параметри у формулу (Б.2), отримуємо

$$\Sigma W_{p.cер} = 13,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,17 - \frac{13,3 \cdot 10^{-3} (6,56 \cdot 10^{-6} + 1,34 \cdot 10^{-4})}{2} - \frac{2,143 \cdot 0,25}{162} + \frac{2,143 \cdot 0,25 (1,2 \cdot 10^6 + 5,9 \cdot 10^4)}{2 \cdot 5,9 \cdot 10^6 \cdot 162} = 1,73 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Кількість n_m знаходимо за формулою (4.39)

$$n_m = \frac{6 \cdot m_m \varepsilon_m}{\rho_m \pi \cdot d_m^3} = \frac{6 \cdot 2,143 \cdot 0,25}{162 \cdot 3,14 \cdot 0,001^3} = 1137473.$$

Тоді середній об'єм однієї рідинної частинки у продовж 1-го циклу [134]

$$W_{p.cер} = \frac{\Sigma W_{p.cер}}{1,5 \cdot n_m} = \frac{1,73 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 1137473} = 1,01 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3.$$

Середню густину $\rho_{p.cер}$ рідинної фази у прес формі у продовж циклу віброударного навантаження визначаємо як середнє арифметичне її максимальної густини $\rho_{p.max}$ при створенні на рідинних частинках зусилля $F_{mz\Sigma max}$ та густини ρ_p при атмосферному тиску: $\rho_{p.cер} = (\rho_{p.max} + \rho_p)/2$ [155].

Максимальну густину обчислюємо за формулою (4.33)

$$\rho_{p.max} = \frac{\rho_p}{1 - \frac{F_{mz\Sigma max}}{K_p S_m}} = \frac{1000}{1 - \frac{16040,9}{2030 \cdot 10^6 \cdot 13,3 \cdot 10^{-3}}} = 1000,594 \text{ м}^3,$$

в якій $K_p = 2030$ МПа – модуль об'ємної пружності рідинної фази, визначений разом із c_{zp} за описаною вище методикою, з використанням формули (Б.4).

Тоді середня густина

$$\rho_{p.cер} = \frac{1000,594 + 1000}{2} = 1000,297 \text{ кг/м}^3.$$

А маса рідинної частинки у продовж 1-го циклу

$$m_p = \rho_{p.cер} W_{p.cер} = 1000,297 \cdot 1,01 \cdot 10^{-9} = 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ кг}.$$

За формулами (Б.1)

$$\alpha_{mz} = 2 \cdot 0,005 \sqrt{49749,4 \cdot 0,471 \cdot 10^{-6}} = 0,0015 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\alpha_{pz} = 2 \cdot 0,005 \sqrt{163880294 \cdot 1,01 \cdot 10^{-6}} = 0,13 \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Межа текучості σ_{0z} твердої фази при стисканні [193] (див. підрозділ 4.2) визначалась таким чином [134]. У суцільну сталеву прес-форму з порожниною діаметром 0,13 м і висотою 0,2 м, установлену на вібростолі ІВПМ-16 [64] до висоти $H_m = 0,17$ м насипався висушений концентрат шламу. Далі вмикався ГП вібропрес-молота і здійснювалось віброударне ущільнювання шламу у прес-формі шляхом струшування, але без прикладання навантаження зверху. На поверхню порції шламу зверху вільно установлювалась сталевая кругла пластина товщиною 0,003 м і діаметром 0,169 м. До верхньої поверхні пластини у чотирьох точках біля периферії, що розташовуються під кутами 90° одна відносно одної, підводились вимірювальні штифти чотирьох індикаторів годинникового типу з ціною поділки $1 \cdot 10^{-5}$ м, закріплених на магнітних стояках. Нуль шкали кожного індикатора суміщався зі стрілкою. На верхню поверхню пластини біля її осі послідовно установлювались гирьки все більшої маси з комплекту лабораторної ваги. Через кілька секунд після установлення гирьки знімались, і якщо стрілки всіх індикаторів повертались при цьому до нульових позначок, це свідчило, що у порції шламу під час попереднього навантаження створювались лише пружні деформації [134]. Коли, після чергового навантаження і розвантаження стрілки індикаторів вже не повернулись до нуля, був зроблений висновок про виникнення у порції шламу під впливом даного навантаження пластичних деформацій [134]. При повторення описаного досліду з ще кількома порціями шламу значення σ_{0z} було уточнене і склало $\sigma_{0z} = 74$ Н.

Абсолютну температуру T_p концентрату шламу [154] у прес-формі під час його третього попереднього віброударного зневоднення на гідроімпульсному вібропресі (див. рисунок 3.3) приймаємо рівною $T_p = 340$ К, з врахуванням початкової температури шламу $T_{p,n} \approx 95$ °С = 368 К та проходження ним перед зневодненням на вібропресі по стрічці гідроімпульсного віброударного сита (див. рисунок 3.2) та через циліндр шнекового преса (див. рисунок 3.3) [154].

Молекулярна маса кавового шламу $M_m = 18$ а.о.м. [234].

Відносна вологість повітря робочої зони, в якій здійснюється процес попереднього зневоднення $\varphi_n = 50\%$ - з врахуванням величин максимальних допустимих температури $t_{нов} = 30$ °С та вологості $\varphi_{n,0} = 55\%$ повітря для виробничих приміщень підприємств харчової промисловості [17, 233].

Силу F_k , що утримує рідинну фазу вологого дисперсного матеріалу у капілярах визначаємо за формулою [145] (1.4)

$$F_{\kappa} = \frac{R \cdot T_p}{M_m} \varphi_n = \frac{8,31 \cdot 340}{18} 55 = 8633 \text{ Н.}$$

Нижче представлені значення конструктивних параметрів і технічна характеристика вібропреса ІВПМ-16 [64]. Крім цього, обчислені його робочі параметри, необхідні для розрахунку зусиль $F_{mz\Sigma}(t)$ та $F_{mz\Sigma max}$.

$$l_3 = 1,5 \text{ м}; d_3 = 0,01 \text{ м}; f_3 = 7,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2; \delta_3 = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; K_3 = K_{z.m} \delta_3 / d_3 = 1,7 \cdot 10^9 \cdot 6,5 \cdot 10^{-3} / 0,01 = 1,1 \cdot 10^9 \text{ Па}; \lambda_3 = 0,025; \zeta_{3\delta 3} = 2 \cdot 0,18 = 0,36; \zeta_{3\delta 3.2} = 4,43; \zeta_{3\delta 3.2} = 1;$$

$$l_4 = 2 \text{ м}; d_4 = 0,01 \text{ м}; f_4 = 7,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2; \delta_4 = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; K_4 = K_{z.m} \delta_4 / d_4 = 1,7 \cdot 10^9 \cdot 6,5 \cdot 10^{-3} / 0,01 = 1,1 \cdot 10^9 \text{ Па}; \lambda_4 = 0,025; \Sigma \zeta_{n4} = 2 \cdot 0,18 = 0,36; \zeta_{\delta. \delta. 2} = 1$$

$$S_z = 1,65 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2; S_{\delta. z} = 7,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2; m_I = 125 \text{ кг}; m_{II} = 80 \text{ кг}; c_y = 2,4 \cdot 10^6 \text{ Н/м}; \lambda_{n. \delta} = 0,018; W_{n. \delta} = 1,57 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3; p_I = 11 \text{ МПа}; P_{cm} = 15700 \text{ Н} (p_H = 2 \text{ МПа}); K_{\delta. z} = K_{cm} \cdot \delta_{\delta. z} / d_{n. \delta} = 2,03 \cdot 10^{11} \cdot 0,015 / 0,1 = 3 \cdot 10^{10} \text{ Па}; K_{n. \phi} = K_{cm} \cdot \delta_{n. \phi} / d_{n. \phi} = 2,03 \cdot 10^{11} \cdot 0,007 / 0,13 = 10,93 \cdot 10^9 \text{ Па}; z_{0y} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}; d_z = 0,145 \text{ м};$$

$$l_{\kappa} = 0,165 \text{ м}; d_{\kappa} = 0,025 \text{ м}; f_{\kappa} = 4,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \delta_{\kappa} = 0,08 \text{ м}; K_{\kappa} = K_{cm} \cdot \delta_{\kappa} / d_{\kappa} = 2,03 \cdot 10^{11} \cdot 0,08 / 0,025 = 6,5 \cdot 10^{11} \text{ Па}; \lambda_{\kappa} = 0,024; \zeta_{3\delta 3\delta} = 13 [64]; \zeta_{\delta x 1} = 1;$$

$$l_I = 0,14 \text{ м}; d_I = 0,05 \text{ м}; f_I = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2; \delta_I = 0,007 \text{ м}; K_I = K_{cm} \delta_I / d_I = 2,03 \cdot 10^{11} \cdot 0,007 / 0,05 = 2,842 \cdot 10^{10} \text{ Па}; \lambda_I = 0,018; \zeta_{\delta x. z} = 0,75; K_{3\delta. a. o} = 6,94 \cdot 10^8 \text{ Па}; W_{a. o} = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3; t_{\epsilon} = 10^{-3} \text{ с.} [65] (\text{див. додаток А});$$

$$l_{0c} = 2,3 \text{ м}; d_{0c} = 0,015 \text{ м}; f_{0c} = 1,77 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \delta_{0c} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; K_{0c} = K_{cm} \delta_{0c} / d_{0c} = 2,03 \cdot 10^{11} \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} / 0,015 = 3,38 \cdot 10^{10} \text{ Па}; \lambda_{0c} = 0,025; \zeta_{3\delta 3. 1} = 4,43; \zeta_{3\delta 0c} = 0,1; \Sigma \zeta_{n0c} = 6 \cdot 0,18 = 1,08;$$

$$l_{0z.m} = 1,2 \text{ м}; d_{0z.m} = 0,016 \text{ м}; f_{0z.m} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \delta_{0z.m} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}; K_{0z.m} = K_{0z.m} \delta_{0z.m} / d_{0z.m} = 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot 7 \cdot 10^{-3} / 0,016 = 7,4 \cdot 10^8 \text{ Па}; \lambda_{0z.m} = 0,025; \Sigma \zeta_{n0z.m} = 2 \cdot 0,18 = 0,36;$$

$$l_{z.a} = 0,71 \text{ м}; d_{z.a} = 0,036 \text{ м}; f_{z.a} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2; \delta_{z.a} = 0,03 \text{ м}; K_{z.a} = K_{cm} \delta_{z.a} / d_{z.a} = 2,03 \cdot 10^{11} \cdot 0,03 / 0,036 = 1,69 \cdot 10^{11} \text{ Па}; \lambda_{z.a} = 0,024; \zeta_{n.z.a} = 1,2; \zeta_{\delta x.a} = 0,35; \zeta_{0z.a} = 0,64; \zeta_{z.a. 3\delta} = 0,27;$$

$$W_a = 2,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3; d_a = 0,18 \text{ м}; S_a = 25,43 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2; \delta_a = 0,015 \text{ м}; K_a = K_{cm} \delta_a / d_a = 2,03 \cdot 10^{11} \cdot 0,015 / 0,18 = 1,69 \cdot 10^{10} \text{ Па}; \lambda_a = 0,024; m_{a.p} = 0,23 \text{ кг};$$

Густина робочої рідини з урахуванням середнього підвищення робочої температури $\Delta t_p = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ [195] (див. формулу (4.19))

$$\rho_{p.p.t} = \frac{\rho_{p.p}}{1 + 8 \cdot 10^{-4} \Delta t_p} = \frac{850}{1 + 8 \cdot 10^{-4} \cdot 20} = 836 \text{ кг/м}^3.$$

За формулой (5.21) [64]

$$m_{II36} = m_{II} + \frac{1}{3} \rho_{p.p.t} \cdot S_2^2 \left(\frac{W_{n.d}}{S_{\partial.2}^2} + \frac{l_4}{f_4} + \frac{l_3}{f_3} \right) = 80 + \frac{1}{3} 836 \cdot (1,65 \cdot 10^{-2})^2 \times$$

$$\times \left(\frac{1,57 \cdot 10^{-3}}{(7,85 \cdot 10^{-3})^2} + \frac{2}{7,85 \cdot 10^{-5}} + \frac{1,5}{7,85 \cdot 10^{-5}} \right) = 80,51 \text{ кг}.$$

За формулами (5.22) [204]

$$\lambda_{36.d} = \lambda_{n.d} \frac{1}{2} W_{n.d} \sqrt{\frac{\pi}{S_{\partial.2}^3}} + \lambda_4 \frac{l_4}{f_4} + \lambda_3 \frac{l_3}{f_3} = 0,018 \frac{1}{2} 1,57 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{3,14}{(7,85 \cdot 10^{-3})^3}} +$$

$$+ 0,025 \frac{2}{7,85 \cdot 10^{-5}} + 0,025 \frac{1,5}{7,85 \cdot 10^{-5}} = 0,068;$$

$$\zeta_{36.d} = \zeta_{6.d.2} + \zeta_{36.32} + \zeta_{36.3} + \zeta_{36.к2} = 1 + 4,43 + 0,36 + 1 = 6,79.$$

За формулой (4.15) [205]

$$K_{p.d} = \frac{K_{p.p} \left(\frac{W_p}{W_2} + 1 \right)}{\frac{W_p}{W_2} + K_{p.p} \frac{p_0}{p_H^2}} = \frac{1,995 \cdot 10^9 \left(\frac{99,997}{0,003} + 1 \right)}{\frac{99,997}{0,003} + 1,995 \cdot 10^9 \frac{101300}{(2 \cdot 10^6)^2}} = 1,992 \cdot 10^9 \text{ Па}.$$

$$K_{p.3} = \frac{K_{p.p} \left(\frac{W_p}{W_2} + 1 \right)}{\frac{W_p}{W_2} + K_{p.p} \frac{p_0}{p_3^2}} = \frac{1,995 \cdot 10^9 \left(\frac{99,997}{0,003} + 1 \right)}{\frac{99,997}{0,003} + 1,995 \cdot 10^9 \frac{101300}{(3280,5)^2}} = 3,53 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

де p_3 – зливний тиск – обчислюємо за формулою (4.18) [195]

$$p_3 = \rho_{p.p.t} \cdot g \cdot h_6 = 836 \cdot 9,81 \cdot 0,4 = 3280,5 \text{ Па},$$

де h_6 - рівень у зливному баку.
Тоді за формулами (5.28) [64]

$$c_{n.d.36} = \frac{S_{\partial.2}^2 \cdot K_{p.\partial} \cdot K_{\partial.2}}{W_{n.\partial} \cdot (K_{p.\partial} + K_{\partial.2})} = \frac{(7,85 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1,992 \cdot 10^9 \cdot 3 \cdot 10^{10}}{1,53 \cdot 10^{-3} (1,992 \cdot 10^9 + 3 \cdot 10^{10})} = 75,2 \cdot 10^6 \frac{H}{m};$$

$$c_{436} = \frac{S_{\partial.2}^2 \cdot K_{p.\partial} \cdot K_4}{l_4 \cdot f_4 \cdot (K_{p.\partial} + K_4)} = \frac{(7,85 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1,992 \cdot 10^9 \cdot 1,1 \cdot 10^9}{2 \cdot 7,85 \cdot 10^{-5} (1,992 \cdot 10^9 + 1,1 \cdot 10^9)} = 278,15 \cdot 10^6 \frac{H}{m};$$

$$c_{336} = \frac{S_{\partial.2}^2 \cdot K_{p.\partial} \cdot K_3}{l_3 \cdot f_3 \cdot (K_{p.\partial} + K_3)} = \frac{(7,85 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1,992 \cdot 10^9 \cdot 1,1 \cdot 10^9}{1,5 \cdot 7,85 \cdot 10^{-5} (1,992 \cdot 10^9 + 1,1 \cdot 10^9)} = 370,7 \cdot 10^6 \frac{H}{m}.$$

За формулою (5.27) [195]

$$c_{o.36} = \frac{1}{\frac{1}{c_y} + \frac{1}{c_{n-\phi.36}}} = \frac{1}{\frac{1}{2,4 \cdot 10^6} + \frac{1}{226,7 \cdot 10^6}} = 2,37 \cdot 10^6 H/m;$$

$$c_{\partial.36} = \frac{1}{\frac{1}{c_{n.d.36}} + \frac{1}{c_{436}} + \frac{1}{c_{336}}} = \frac{1}{\frac{1}{75,2 \cdot 10^6} + \frac{1}{278,15 \cdot 10^6} + \frac{1}{370,7 \cdot 10^6}} = 51 \cdot 10^6 H/m.$$

За формулами (5.26) [64]

$$\alpha_z = 2 \cdot \beta \sqrt{c_y m_I} = 2 \cdot 0,005 \sqrt{2,4 \cdot 10^6 \cdot 125} = 173,2 \text{ Па}\cdot\text{с};$$

$$\alpha_{\partial.2} = 2 \cdot \beta \sqrt{c_{\partial.36} m_{II36}} = 2 \cdot 0,005 \sqrt{51 \cdot 10^6 \cdot 80,51} = 640,78 \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

Враховуючи те, що $K_{p,p}$ дуже несуттєво залежить від величини тиску у середовищі робочої рідини у продовж циклу спрацьовування ГП вібропреса (див. результати розрахунку $K_{z-p.a.a1}$, $K_{z-p.a.a2}$, $K_{z-p.a.a.cp}$ у додатку А) і що ударний тиск $\Delta p_{y\partial l} + p_3$ буде лише незначно менший за тиск p_I (див. формули 5.8), розрахунок $K_{p,yI}$ здійснюємо за формулою (4.15) [196], приймаючи $\Delta p_{y\partial l} + p_3 \approx p_I$

$$K_{p.yl} = \frac{K_{p.p} \left(\frac{W_p}{W_z} + 1 \right)}{\frac{W_p}{W_z} + K_{p.p} \frac{p_0}{p_1^2}} = \frac{1,995 \cdot 10^9 \left(\frac{99,997}{0,003} + 1 \right)}{\frac{99,997}{0,003} + 1,995 \cdot 10^9 \frac{101300}{(11 \cdot 10^6)^2}} = 1,99 \cdot 10^9 \text{ Па.}$$

За формулами (5.4 - 5.6) [64, 204]

$$m_{a.o.p} = \frac{1}{3} f_{z.a}^2 \cdot \rho_{p.p.t} \left(\frac{l_{0c}}{f_{0c}} + \frac{l_{0z.m}}{f_{0z.m}} + \frac{l_{z.a}}{f_{z.a}} + \frac{W_a}{S_a^2} \right) =$$

$$= \frac{1}{3} \cdot (1 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 836 \left(\frac{2,3}{1,77 \cdot 10^{-4}} + \frac{1,2}{2 \cdot 10^{-4}} + \frac{0,71}{1 \cdot 10^{-3}} + \frac{2,75 \cdot 10^{-3}}{(25,43 \cdot 10^{-3})^2} \right) = 1,15 \text{ кг};$$

$$m_{\kappa.p} = \frac{1}{3} \rho_{p.p.t} \cdot l_{\kappa} f_{\kappa} = \frac{1}{3} 836 \cdot 0,165 \cdot 4,9 \cdot 10^{-4} = 0,023 \text{ кг};$$

$$m_{lp} = \frac{1}{3} \rho_{p.p.t} \cdot l_l \cdot f_l = \frac{1}{3} 836 \cdot 0,14 \cdot 1,96 \cdot 10^{-3} = 0,076 \text{ кг}.$$

$$\lambda_{3в.а.о} = \lambda_{0c} \frac{l_{0c}}{d_{0c}} + \lambda_{0z.m} \frac{l_{0z.m}}{d_{0z.m}} + \lambda_{z.a} \frac{l_{z.a}}{d_{z.a}} + \frac{1}{2} \lambda_a \cdot W_a \sqrt{\frac{\pi}{S_a^3}} = 0,025 \frac{2,3}{1,77 \cdot 10^{-4}} +$$

$$+ 0,025 \frac{1,2}{2 \cdot 10^{-4}} + 0,024 \frac{0,71}{1 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2} 0,024 \cdot 2,75 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{3,14}{(25,43 \cdot 10^{-3})^3}} = 0,098;$$

$$\zeta_{3в.а.о} = \frac{\left(\zeta_{3в.3l} + \frac{\zeta_{3в0c} \cdot \zeta_{3в.p} \cdot \zeta_{в.б}}{\zeta_{3в0c} + \zeta_{3в.p} + \zeta_{в.б}} + \frac{\zeta_{3в0c} \cdot \zeta_{3в.к1}}{\zeta_{3в0c} + \zeta_{3в.к1}} + \sum \zeta_{n0z.m} + \zeta_{0z.a} \right) \cdot (\zeta_{вх.а} + 2 \cdot \zeta_{n.z.a})}{\zeta_{3в.3l} + \frac{\zeta_{3в0c} \cdot \zeta_{3в.p} \cdot \zeta_{в.б}}{\zeta_{3в0c} + \zeta_{3в.p} + \zeta_{в.б}} + \frac{\zeta_{3в0c} \cdot \zeta_{3в.к1}}{\zeta_{3в0c} + \zeta_{3в.к1}} + \sum \zeta_{n0z.m} + \zeta_{0z.a} + \zeta_{вх.а} + 2 \cdot \zeta_{n.z.a}}$$

$$+ 2 \cdot \zeta_{n.z.a} + \zeta_{z.a.3б} + \zeta_{3в.3б} =$$

$$= \frac{\left(4,43 + \frac{0,1 \cdot 3 \cdot 1}{0,1 + 3 + 1} + \frac{0,1 \cdot 0,1}{0,1 + 0,1} + 0,36 + 0,64 \right) (0,35 + 2 \cdot 1,2)}{4,43 + \frac{0,1 \cdot 3 \cdot 1}{0,1 + 3 + 1} + \frac{0,1 \cdot 0,1}{0,1 + 0,1} + 0,36 + 0,64 + 0,35 + 2 \cdot 1,2} + 2 \cdot 1,2 + 0,27 + 13 = 17,51.$$

З врахуванням співвідношення $v_{k,p} = v_{lp} f_l / f_k$ та після підстановки залежностей (5.9), формули (5.8) перетворюються до вигляду

$$\Delta p_{y\partial.k} = p_l - p_3 - \Delta p_{exl} - \Delta p_{m.k} = p_l - p_3 - \rho_{p.p.t} \frac{v_{lp}^2}{2} \left(\zeta_{exl} \frac{f_l^2}{f_k^2} + \lambda_k \frac{l_k f_l^2}{f_k^3} \right);$$

$$\Delta p_{y\partial l} = \Delta p_{y\partial.k} - \Delta p_{ex.z} - \Delta p_{ml} = p_l - p_3 - \rho_{p.p.t} \frac{v_{lp}^2}{2} \left(\zeta_{exl} \frac{f_l^2}{f_k^2} + \lambda_k \frac{l_k f_l^2}{f_k^3} + \zeta_{ex.z} + \lambda_l \frac{l_l}{f_l} \right). \quad (Б.5)$$

За формулами (5.2 – 5.6, 5.7) [64, 205, 195]

$$E_{n.a} = E_{k.n} + E_{n.n} = E_{k.n.a} + E_{k.n.k} + E_{k.nl} + E_{n.n.k} + E_{n.nl} = \frac{v_{lp}^2}{2} \times \quad (Б.6)$$

$$\times \left[\frac{m_{a.o.p} f_l^2}{f_{z.a}^2} (1 + \lambda_{зв.a.o} + \zeta_{зв.a.o}) + \frac{m_{k.p} f_l^2}{f_k^2} \left(1 + \lambda_k \frac{l_k}{d_k} + \zeta_{exl} \right) + \right. \\ \left. m_{lp} \left(1 + \lambda_l \frac{l_l}{d_l} + \zeta_{ex.z} \right) \right] + \\ + \frac{\Delta p_{y\partial.k}^2 l_k f_k (K_{p.yl} + K_k)}{2 \cdot K_{p.yl} K_k} + \frac{\Delta p_{y\partial l}^2 l_l f_l (K_{p.yl} + K_l)}{2 \cdot K_{p.yl} K_l},$$

де значення $E_{n.a}$ беремо з додатку А.

Підставляємо у рівняння (Б.5, Б.6) чисельні значення параметрів.

$$\Delta p_{y\partial.k} = 11 \cdot 10^6 - 3280,5 - v_{lp}^2 \frac{836}{2} \left(\frac{1,96 \cdot 10^{-3}}{4,9 \cdot 10^{-4}} \right)^2 \times \quad (Б.7)$$

$$\times \left(1 + 0,024 \frac{0,165}{4,9 \cdot 10^{-4}} \right) = 10,997 \cdot 10^6 - 6,07 \cdot 10^4 v_{lp}^2;$$

$$\Delta p_{y\partial l} = 11 \cdot 10^6 - 3280,5 - v_{lp}^2 \frac{836}{2} \left(1 \left(\frac{1,96 \cdot 10^{-3}}{4,9 \cdot 10^{-4}} \right)^2 + 0,024 \frac{0,165 (1,96 \cdot 10^{-3})^2}{(4,9 \cdot 10^{-4})^3} \right) = \\ + 0,75 + 0,018 \frac{0,14}{1,96 \cdot 10^{-3}} \quad (Б.8)$$

$$= 10,997 \cdot 10^6 - 6,16 \cdot 10^4 v_{lp}^2.$$

$$\begin{aligned}
318,4 = \frac{v_{lp}^2}{2} & \left[1,15 \left(\frac{1,96 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} \right)^2 (1 + 0,098 + 17,51) + 0,023 \left(\frac{1,96 \cdot 10^{-3}}{4,9 \cdot 10^{-4}} \right)^2 \times \right. \\
& \left. \times \left(1 + 0,024 \frac{0,165}{0,025} + 1 \right) + 0,076 \left(1 + 0,018 \frac{0,14}{0,05} + 0,75 \right) \right] + \\
& + \Delta p_{y\delta, \kappa}^2 \frac{0,165 \cdot 4,9 \cdot 10^{-4} (1,99 \cdot 10^9 + 6,5 \cdot 10^{11})}{2 \cdot 1,99 \cdot 10^9 \cdot 6,5 \cdot 10^{11}} + \\
& + \Delta p_{y\delta l}^2 \frac{0,14 \cdot 1,96 \cdot 10^{-3} (1,99 \cdot 10^9 + 2,84 \cdot 10^{10})}{2 \cdot 1,99 \cdot 10^9 \cdot 2,84 \cdot 10^{10}} = \\
& = 41,57 \cdot v_{lp}^2 + 2 \cdot 10^{-14} \Delta p_{y\delta, \kappa}^2 + 7,38 \cdot 10^{-14} \Delta p_{y\delta l}^2.
\end{aligned} \tag{Б.9}$$

Підставляємо рівняння (Б.7, Б.8) у рівняння (Б.9)

$$\begin{aligned}
& 41,57 \cdot v_{lp}^2 + 2 \cdot 10^{-14} (10,997 \cdot 10^6 - 60737,96 \cdot v_{lp}^2)^2 + \\
& + 7,38 \cdot 10^{-14} (10,997 \cdot 10^6 - 61590,51 \cdot v_{lp}^2)^2 = 318,4; \\
& 41,57 \cdot v_{lp}^2 + 2 \cdot 10^{-14} \left(\begin{aligned} & \left((10,997 \cdot 10^6)^2 - 2 \cdot 10,997 \cdot 10^6 \cdot 60737,96 \cdot v_{lp}^2 \right) \\ & + (60737,96 \cdot v_{lp}^2)^2 \end{aligned} \right) + \\
& + 7,38 \cdot 10^{-14} \left(\left((10,997 \cdot 10^6)^2 - 2 \cdot 10,997 \cdot 10^6 \cdot 61590,51 \cdot v_{lp}^2 + (61590,51 \cdot v_{lp}^2)^2 \right) \right) = 318,4; \\
& 41,57 \cdot v_{lp}^2 + 2,42 - 2,67 \cdot 10^{-2} v_{lp}^2 + 7,4 \cdot 10^{-5} v_{lp}^4 + 8,93 - \\
& - 0,1 \cdot v_{lp}^2 + 2,8 \cdot 10^{-4} v_{lp}^4 = 41,44 \cdot v_{lp}^2 + 11,6 + 3,54 \cdot 10^{-4} v_{lp}^4 = 318,4;
\end{aligned}$$

$$3,54 \cdot 10^{-4} v_{1p}^4 + 41,44 \cdot v_{1p}^2 - 306,8 = 0;$$

$$v_{1p} = \sqrt{\frac{-41,44 + \sqrt{(41,44)^2 + 4 \cdot 3,54 \cdot 10^{-4} \cdot 306,8}}{2 \cdot 3,54 \cdot 10^{-4}}} = 2,71 \text{ м / с.}$$

Підставляємо значення v_{1p} у рівняння (Б.7, Б.8). Отримуємо

$$\Delta p_{y\partial.k} = 10,997 \cdot 10^6 - 60737,96 \cdot v_{1p}^2 = 10,997 \cdot 10^6 - 60737,96 \cdot 2,71^2 = 10,551 \text{ МПа};$$

$$\Delta p_{y\partial.l} = 10,997 \cdot 10^6 - 61590,51 \cdot v_{1p}^2 = 10,997 \cdot 10^6 - 61590,51 \cdot 2,71^2 = 10,545 \text{ МПа.}$$

Визначаємо момент часу початку руху плунжера гідроциліндра ГП: $t = t_n + t_3$ (див. формулу (5.44)). При цьому t_n знаходимо за формулами (5.10, 5.12)

$$c_1 = l / \sqrt{\frac{\rho_{p.p.t}}{K_{p.yl}} + \frac{\rho_{p.p.t}}{K_1}} = l / \sqrt{\frac{836}{1,99 \cdot 10^9} + \frac{836}{2,842 \cdot 10^{10}}} = 1491,68 \text{ м / с};$$

$$t_n = \frac{l_k + l_l}{c_1} = \frac{0,165 + 0,14}{1491,68} = 2,04 \cdot 10^{-4} \text{ с,}$$

а t_3 визначаємо за умовою $t_3 = \frac{t_o}{2} > t_{il}$ (див. підрозділ 5.3), в якій t_o розраховуємо за формулами (4.10, 4.11), тоді як t_{il} - за залежністю (5.10)

$$t_{n.m} = \frac{2 \cdot E_{n.a}}{Q_{n1}(p_1 + p_2)} = \frac{2 \cdot 318,4}{1,1 \cdot 10^{-3} (11 \cdot 10^6 + 4 \cdot 10^6)} = 3,86 \cdot 10^{-2} \text{ с};$$

$$t_o = T_y - t_{n.m} = \frac{l}{25} - 3,86 \cdot 10^{-2} = 0,04 - 3,86 \cdot 10^{-2} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$t_{il} = \frac{l_l}{c_1} = \frac{0,14}{1491,68} = 9,39 \cdot 10^{-5} \text{ с.}$$

Умова $t_3 = \frac{t_o}{2} = \frac{1,4 \cdot 10^{-3}}{2} = 7 \cdot 10^{-4} > t_{il} = 9,39 \cdot 10^{-5}$ виконується, отже $t_3 = t_{il} = 9,39 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ (див. підрозділ 5.3).

Тоді момент часу початку руху плунжера гідроциліндра ГП

$$t = t_n + t_3 = 2,04 \cdot 10^{-4} + 9,39 \cdot 10^{-5} = 2,98 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

З формул (5.16, 5.17, 5.18, 5.38, 5.39) отримуємо рівняння

$$\begin{aligned} m_{1p} \frac{d_2^4 v_{1p}^2}{d_1^4} \frac{1}{2} + \frac{l_1 \cdot f_l (\Delta p_{y\partial l}^2 - \Delta p_{y\partial 11}^2) (K_{p.yl} + K_l)}{2 \cdot K_{p.yl} \cdot K_l} = \\ = \frac{v_{In}^2}{2} \left[m_I + m_{II3\partial} (1 + \lambda_{3\partial} + \zeta_{3\partial}) + m_{1p} \frac{d_2^4 S_2^2}{d_1^4 f_l^2} \right] + \frac{c_y \cdot z_{0y}^2}{2}; \\ t_3 (S_2 \cdot \Delta p_{y\partial 11} - c_y \cdot z_{0y}) = v_{In} [m_I + m_{II3\partial} (1 + \lambda_{3\partial} + \zeta_{3\partial})]. \end{aligned} \quad (\text{Б.10})$$

Після підстановки у рівняння (Б.10) чисельних значень заданих та попередньо визначених параметрів отримуємо

$$\begin{aligned} 0,076 \frac{2,71^2}{2} + \frac{0,14 \cdot 1,96 \cdot 10^{-3} (1,99 \cdot 10^9 + 2,84 \cdot 10^{10})}{2 \cdot 1,99 \cdot 10^9 \cdot 2,84 \cdot 10^{10}} \times \\ \times \left((10,545 \cdot 10^6)^2 - \Delta p_{y\partial 11}^2 \right) = \frac{2,4 \cdot 10^6 \cdot (2 \cdot 10^{-3})^2}{2} + \frac{v_{In}^2}{2} \times \\ \times \left[125 + 80,51(1 + 0,068 + 6,79) + 0,076 \left(\frac{1,65 \cdot 10^{-2}}{1,96 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \right]; \\ 3,68 - 7,38 \cdot 10^{-14} \Delta p_{y\partial 11}^2 = 381,52 \cdot v_{In}^2; \end{aligned} \quad (\text{Б.11})$$

$$9,39 \cdot 10^{-5} (1,65 \cdot 10^{-2} \Delta p_{y\partial 11} - 2,4 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-3}) = v_{In} [125 + 80,51(1 + 0,068 + 6,79)];$$

$$1,55 \cdot 10^{-6} \Delta p_{y\partial 11} - 0,451 = 757,65 \cdot v_{In}. \quad (\text{Б.12})$$

З рівняння (Б.12) отримуємо

$$v_{In} = \frac{1,55 \cdot 10^{-6} \Delta p_{y\partial 11} - 0,451}{757,65} = 2,05 \cdot 10^{-9} \Delta p_{y\partial 11} - 5,95 \cdot 10^{-4}. \quad (\text{Б.13})$$

Підставляємо (Б.13) у (Б.11)

$$\begin{aligned}
 3,68 - 7,38 \cdot 10^{-14} \Delta p_{y\partial II}^2 &= 381,52 \cdot (2,05 \cdot 10^{-9} \Delta p_{y\partial II} - 5,95 \cdot 10^{-4})^2 = \\
 &= 381,52 (4,2 \cdot 10^{-18} \Delta p_{y\partial II}^2 - 2,44 \cdot 10^{-12} \Delta p_{y\partial II} + 3,54 \cdot 10^{-7}) = \\
 &= 5,07 \cdot 10^{-15} \Delta p_{y\partial II}^2 - 9,31 \cdot 10^{-10} \Delta p_{y\partial II} + 1,35 \cdot 10^{-4}; \\
 7,89 \cdot 10^{-14} \Delta p_{y\partial II}^2 - 9,31 \cdot 10^{-10} \Delta p_{y\partial II} - 3,68 &= 0; \\
 \Delta p_{y\partial II} &= \frac{9,31 \cdot 10^{-10} + \sqrt{(9,31 \cdot 10^{-10})^2 + 4 \cdot 7,89 \cdot 10^{-14} \cdot 3,68}}{2 \cdot 7,89 \cdot 10^{-14}} = 6,84 \text{ МПа}.
 \end{aligned}$$

Підставляємо отримане значення $\Delta p_{y\partial II}$ у (Б.13)

$$v_{In} = 2,05 \cdot 10^{-9} 6,84 \cdot 10^6 - 5,95 \cdot 10^{-4} = 1,34 \cdot 10^{-2} \text{ м/с.}$$

За формулами (5.30)

$$R_{\partial, z} = 0,1 \cdot S_z \Delta p_{y\partial II} = 0,1 \cdot 1,65 \cdot 10^{-2} 6,84 \cdot 10^6 = 11286 \text{ Н.}$$

Підставляємо розраховані у даному додатку значення параметрів у рівняння (4.6, 4.17, 4.20, 5.16, 5.17, 5.18, 5.38, 5.39). Рівняння (5.38, 5.39) використовуємо у диференціальній формі. Отримуємо [187]

$$\begin{cases} c_{pz} z_p + \alpha_{pz} \mathfrak{z}_p - c_{mz} z_{m.np} - \alpha_{mz} \mathfrak{z}_m - \sigma_{0z} = 0; \\ z_I - z_{II} = z_{m.nl} + z_{m.np} + z_p. \end{cases} \quad (\text{Б.14})$$

$$\begin{cases} 163880294 \cdot z_p + 0,13 \cdot \mathfrak{z}_p - 49749,4 \cdot z_{m.np} - 0,0015 \cdot \mathfrak{z}_m - 74 = 0; \\ z_I - z_{II} = z_p + z_{m.nl} + z_{m.np}. \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 F_{mzI}(t) &= (\Delta p_{y\partial II} + p_3) \cdot S_z - m_I (\mathfrak{z}_I + g) - (\alpha_z + \alpha_{mz} + \alpha_{pz}) \times \\
 &\times (\mathfrak{z}_I - \mathfrak{z}_{II}) - c_y (z_I + z_{0y}) - (c_{mz} + c_{pz}) (z_I - z_{II}) - \sigma_{0z} - F_K;
 \end{aligned}$$

$$F_{mzI}(t) = (6,84 \cdot 10^6 + 3280,5)1,65 \cdot 10^{-2} - 125(\mathfrak{z}_I + 9,81) - (173,2 + 0,0015 + 0,13) \times \\ \times (\mathfrak{z}_I - \mathfrak{z}_{II}) - 2,4 \cdot 10^6 (z_I + 2 \cdot 10^{-3}) - 4,97 \cdot 10^4 (z_I - z_{II}) - 74 - 8633;$$

$$F_{mzI}(t) = 9,81 \cdot 10^4 - 125 \cdot \mathfrak{z}_I - 17333 \cdot \mathfrak{z}_I - 17333 \cdot \mathfrak{z}_{II} - 2,897 \cdot 10^6 \cdot z_I + 4,97 \cdot 10^5 \cdot z_{II}; \quad (\text{B.15})$$

$$F_{mzII}(t) = m_{II}(g + \mathfrak{z}_{II}) + (\alpha_{\partial.z} + \alpha_{mz} + \alpha_{pz})(\mathfrak{z}_{II} - \mathfrak{z}_I) + \\ + (c_{mz} + c_{pz})(z_{II} - z_I) + R_{\partial.z} \text{sign}(\mathfrak{z}_{II} - \mathfrak{z}_I) + \sigma_{0z} + P_{cm} + F_{\kappa};$$

$$F_{mzII}(t) = 80,51(9,81 + \mathfrak{z}_{II}) + (640,78 + 0,0015 + 0,13)(\mathfrak{z}_{II} - \mathfrak{z}_I) + \\ + 4,97 \cdot 10^4 (z_{II} - z_I) + 11286(\mathfrak{z}_{II} - \mathfrak{z}_I) + 74 + 15700 + 8633;$$

$$F_{mzII}(t) = 25196,8 + 80,51 \cdot \mathfrak{z}_{II} + 11926,9 \cdot \mathfrak{z}_{II} - \\ - 11926,9 \cdot \mathfrak{z}_I + 4,97 \cdot 10^4 \cdot z_{II} - 4,97 \cdot 10^4 \cdot z_I; \quad (\text{B.16})$$

$$F_{mz\Sigma}(t) = F_{mzI}(t) + F_{mzII}(t); \quad (\text{B.17})$$

$$m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} (\mathfrak{z}_m + g) + \alpha_{mz} \mathfrak{z}_m + c_{mz} z_m + \sigma_{0z} = F_{mz\Sigma}(t);$$

$$5,2 \cdot 10^{-7} \mathfrak{z}_m + 1,5 \cdot 10^{-3} \mathfrak{z}_m + 5 \cdot 10^4 z_m + 74 = F_{mz\Sigma}(t); \quad (\text{B.18})$$

$$m_p (\mathfrak{z}_p + g) + \alpha_{pz} \mathfrak{z}_p + c_{pz} z_p + F_{\kappa} = F_{mz\Sigma}(t);$$

$$10^{-6} \mathfrak{z}_p + 0,13 \cdot \mathfrak{z}_p + 163880294 \cdot z_p + 8633 = F_{mz\Sigma}(t); \quad (\text{B.19})$$

$$\frac{m_{1p}}{2} \frac{d_2^4}{d_1^4} \left(v_{1p}^2 - \mathfrak{z}_I^2 \frac{S_2^2}{f_1^2} \right) + \frac{l_1 \cdot f_1 (\Delta p_{y\partial I}^2 - \Delta p_{y\partial II}^2) (K_{p.yI} + K_I)}{2 \cdot K_{p.yI} \cdot K_I} = \\ = \frac{m_I \cdot \mathfrak{z}_I^2}{2} + \frac{m_{II36} \cdot \mathfrak{z}_{II}^2}{2} (1 + \lambda_{36.\partial} + \zeta_{36.\partial}) + \frac{c_y \cdot (z_{0y} + z_I)^2}{2};$$

$$\begin{aligned} & \frac{0,076}{2} \left(2,71^2 - \frac{1,65 \cdot 10^{-2}}{1,96 \cdot 10^{-3}} \right)^2 + \\ & + \frac{0,14 \cdot 1,96 \cdot 10^{-3} \left((10,545 \cdot 10^6)^2 - (6,84 \cdot 10^6)^2 \right) (1,99 \cdot 10^9 + 2,842 \cdot 10^{10})}{2 \cdot 1,99 \cdot 10^9 \cdot 2,842 \cdot 10^{10}} = \\ & = \frac{125 \cdot z_I^2}{2} + \frac{80,51 \cdot z_{II}^2}{2} (1 + 0,068 + 6,79) + \frac{2,4 \cdot 10^6 \cdot (2 \cdot 10^{-3} + z_I)^2}{2}; \\ & 65,193 \cdot z_I^2 + 316,32 \cdot z_{II}^2 + 1,2 \cdot 10^6 \cdot z_I^2 + 4800 \cdot z_I - 0,23 = 0; \quad (\text{Б.20}) \end{aligned}$$

$$t(S_2 \cdot \Delta p_{y0II} - c_y \cdot (z_{0y} + z_I)) = m_I \cdot z_I + m_{II36} z_{II} (1 + \lambda_{36.0} + \zeta_{36.0});$$

$$\begin{aligned} & t(1,65 \cdot 10^{-2} \cdot 6,84 \cdot 10^6 - 2,4 \cdot 10^6 \cdot (z_I + 2 \cdot 10^{-3})) = \\ & = 125 \cdot z_I + 80,51 \cdot z_{II} (1 + 0,068 + 6,79); \end{aligned}$$

$$125 \cdot z_I + 632,65 \cdot z_{II} + 2,4 \cdot 10^6 \cdot z_I \cdot t - 1,08 \cdot 10^5 \cdot t = 0; \quad (\text{Б.21})$$

$$t_n + t_3 = 2,98 \cdot 10^{-4} \leq t \leq t_o = 1,4 \cdot 10^{-3}. \quad (\text{Б.22})$$

З використанням рівнянь (Б.14 – Б.22) у середовищі Matlab R2007a Simulink складена програма, блок схеми якої наведені на рисунках 4.9, 4.10, розраховані і побудовані залежності зміни в часі $F_{mzI}(t)$, $F_{mzII}(t)$, $F_{mz\Sigma}(t)$, $z_I(t)$, $z_{II}(t)$, $z_p(t)$, $z_{m.np}(t)$, $z_{m.nl}(t)$, $z_m(t)$, представлені на рисунках 4.11, 4.12 [235]. При різних значеннях маси m_{II} рухомої траверси з інерційними вантажами вібропреса-прототипа, величини попереднього стискання z_{0y} пружин повернення його вібростолу, тиску відкриття p_I віброзбуджувача та робочого об'єму W_a гідроаккумулятора (див. підрозділи 4.2, 4.3), з використанням Matlab-програми та на підставі отриманих з її допомогою графіків $F_{mz\Sigma}(t)$, побудовані залежності максимальних значень зусилля $F_{mz\Sigma max}$ двостороннього навантаження порції вологого дисперсного матеріалу від m_{II} , z_{0y} , p_I , W_a , наведені на рисунку 4.13 [235].

Додаток В.
Дослідження динаміки коливальних процесів у
середовищі вологих дисперсних матеріалів
під час їх віброударного зневоднення

Як встановлено у підрозділі 4.1, висока ефективність способу віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів у прес-формі закритого типу на гідроімпульсному вібропресі (див. рисунок 3.3) обумовлена створенням у середовищі порції матеріалу при його реалізації хвиль дотичних та стискаючих прямих та зворотних напружень та деформацій (див. рисунок 4.4). В результаті тверді частинки порції приводяться у коливальний рух, що сприяє їх взаємним поворотам, прослизанням, більш щільному укладанню та видаленню з проміжків між частинками рідини (див. підрозділ 4.1). Таким чином, у порівнянні із статичним пресуванням при використанні пропонованого способу забезпечується підвищення продуктивності та зменшення енергоємності робочого процесу при суттєвому зниженні кінцевої вологості концентрату матеріалу (див. підрозділ 2.1 та додаток А).

Параметри даних коливань твердих частинок порції матеріалу під час його віброударного зневоднення можна визначити за допомогою рівнянь руху частинок та виконавчих елементів вібропреса на різних етапах циклу спрацьовування його ГПП (див. підрозділ 4.2). Зокрема, рівняння руху твердої частинки, що контактує з днищем прес-форми на І-му етапі циклу віброударного зневоднення мають вигляд

$$m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} \ddot{x}_m + \alpha_{mx} \dot{x}_m + c_{mx} x_m + \tau_{0x} = F_{mzI}(t) \cdot k_f; t_n + t_{iI} < t \leq t_I;$$

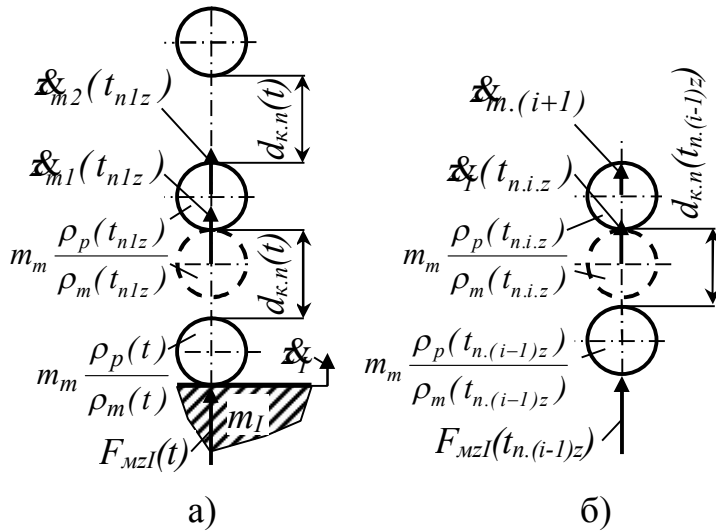
$$m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} \ddot{y}_m + \alpha_{my} \dot{y}_m + c_{my} y_m + \tau_{0y} = F_{mzI}(t) \cdot k_f; t_n + t_{iI} < t \leq t_I; \quad (B.1)$$

$$m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} (\ddot{z}_m + g) + \alpha_{mz} \dot{z}_m + c_{mz} z_m + \sigma_{0z} = F_{mzI}(t); t_n + t_{iI} < t \leq t_I.$$

Рівняння (B.1) можуть бути розв'язані в середовищі Matlab Simulink разом з рівняннями (4.17) для розрахунку зусиль $F_{mzI}(t)$, $F_{mzII}(t)$, рівняннями руху рідинної фази (4.20), рівняннями балансів енергії (5.38), з підстановкою формул (5.16 – 5.18) та рівняння збереження імпульсів (5.39) для виконавчих елементів вібропреса на І-му етапі [183] (див. також підрозділ 4.3 і додаток Б). При розв'язанні цих рівнянь для моменту часу $t = t_n + t_{iI}$ отримуємо дані для визначення параметрів ударної взаємодії

твердої частинки нижнього шару порції, що прилягає до днища прес-форми з частинкою 2-го шару (див. рисунок 4.4, а).

На рисунку В.1, а представлена схема цієї взаємодії відносно осі z , на



якій частинка нижнього шару в момент удару показана пунктирною лінією. При цьому з врахуванням періодичного рівномірного перерозподілення твердих частинок по об'єму порції матеріалу під час його віброударного зневоднення (див. підрозділ 4.1), приймаємо припущення, що початкова відстань між частинками сусідніх шарів

Рисунок В.1 – Схеми для розрахунку динамічних параметрів коливального процесу у середовищі вологого дисперсного матеріалу під час його віброударного зневоднення

для розглядуваного моменту часу $t = t_n + t_{il} + t_{n1z}$ n -го циклу ГП є величиною стабільною. Дана відстань

відповідає діаметру $d_{k,n}(t)$ каналів між твердими частинками у момент часу $t = t_n + t_{il}$ (див. формулу (4.54), підрозділ 4.3 та рисунок В.1, а). Тоді тривалість t_{n1z} переміщення частинки нижнього шару до її взаємодії з частинкою другого шару відносно осі z визначаємо як [190]

$$t_{n1z} = \sqrt{\frac{2 \cdot d_{k,n}(t)}{g}}; \quad t = t_n + t_{il}. \quad (B.2)$$

З використанням рівнянь математичної моделі досліджуваного процесу (див. вище) можна визначити швидкість $v_{m1} = v_{m1}(t_n + t_{il} + t_{n1z})$ частинки нижнього шару в момент її ударної взаємодії з частинкою другого шару. Останній після взаємодії передається частина енергії маси m_1 , в результаті чого дана частинка одержує швидкість $v_{m2} = v_{m2}(t_n + t_{il} + t_{n1z})$ (див. рисунок В.1, а). Щодо частинки нижнього шару, то її швидкість v_{m1}' після удару розраховується за рівнянням збереження імпульсу, з врахуванням коефіцієнта відновлення швидкості R [197]. Але для спрощення розрахунків величину v_{m1}' можна з високим ступенем наближення прийняти рівною швидкості переміщення маси m_1 :

$\mathcal{U}'_{m1} = \mathcal{U}(t_n + t_{il} + t_{nlz})$. Тоді рівняння збереження імпульсу під час ударної взаємодії нижньої і верхньої частинок можна представити у вигляді

$$m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} \mathcal{U}'_{m1} = m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} \mathcal{U} + m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} \mathcal{U}'_{m2}; \quad t = t_n + t_{il} + t_{nlz}. \quad (\text{B.3})$$

Звідки

$$\mathcal{U}'_{m2} = \mathcal{U}'_{m1} - \mathcal{U}; \quad t = t_n + t_{il} + t_{nlz}. \quad (\text{B.4})$$

За аналогією з формулою (B.2) тривалість t_{nlx} , t_{nly} переміщення твердих частинок, що розташовуються біля днища та вертикальної осі прес-форми до їх ударної взаємодії із найближчими сусідніми частинками відносно осей x , y (див. рисунок 4.4, г) визначаємо як

$$t_{nlx} = \sqrt{\frac{2 \cdot l_{\kappa.n}(t)}{\mathcal{U}'_{mx}}}; \quad t_{nly} = \sqrt{\frac{2 \cdot l_{\kappa.n}(t)}{\mathcal{U}'_{my}}}; \quad t = t_n + t_{il}, \quad (\text{B.5})$$

де $l_{\kappa.n}(t)$ – довжина каналу між твердими частинками при їх переміщенні відносно осей x , y , яку можна знайти, виходячи із сумарної довжини каналів $\Sigma l_{\kappa.n}(t)$ (див. формулу (4.55)) та числа рідинних частинок порції n_p (див. підрозділ 4.3)

$$l_{\kappa.n}(t) = \frac{\Sigma l_{\kappa.n}(t)}{n_p}; \quad t = t_n + t_{il}. \quad (\text{B.6})$$

Під час ударної взаємодії твердих частинок, що розташовуються біля осі прес-форми із сусідніми частинками відносно осей x , y їх швидкість змінюється від $\mathcal{U}_{m1} = \mathcal{U}_{m1}(t_n + t_{il} + t_{nlx})$, $\mathcal{U}_{m1} = \mathcal{U}_{m1}(t_n + t_{il} + t_{nly})$ до \mathcal{U}'_{m1} , \mathcal{U}'_{m1} . Сусідні частинки після взаємодії одержують швидкості $\mathcal{U}'_{m2} = \mathcal{U}'_{m2}(t_n + t_{il} + t_{nlx})$, $\mathcal{U}'_{m2} = \mathcal{U}'_{m2}(t_n + t_{il} + t_{nly})$. Швидкості \mathcal{U}'_{m1} , \mathcal{U}'_{m1} можна визначити з врахуванням коефіцієнта відновлення R [197] (див. даний додаток вище) або з високим ступенем наближення прирівняти їх до відповідних швидкостей \mathcal{U}'_{p1} , \mathcal{U}'_{p1} переміщення рідинної фази по каналу довжиною $l_{\kappa.n}(t)$ з розгалуженням (див. підрозділ 4.3)). Рівняння Бернуллі [205] для перерізів на початку і наприкінці каналу довжиною $l_{\kappa.n}(t)$ відносно розглядуваних осей мають вигляд (див. також формулу (4.56))

$$\Delta p_m(t) + \rho_p(t) \frac{\mathcal{U}'_{p1}{}^2}{2} = \Delta p_m(t) + \rho_p(t) \frac{\mathcal{U}'_{p1}{}^2}{2} + \lambda_n(t) \rho_p(t) \frac{l_{\kappa.n}(t)}{d_{\kappa.n}(t)} \frac{\mathcal{U}'_{p1}{}^2}{2} + \zeta_p \rho_p(t) \frac{\mathcal{U}'_{p1}{}^2}{2};$$

$$\Delta p_m(t) + \rho_p(t) \frac{\dot{x}_{pl}^2}{2} = \Delta p_m(t) + \rho_p(t) \frac{\dot{x}_{pl}'^2}{2} + \lambda_n(t) \rho_p(t) \frac{l_{\kappa,n}(t)}{d_{\kappa,n}(t)} \frac{\dot{x}_{pl}^2}{2} + \zeta_p \rho_p(t) \frac{\dot{x}_{pl}^2}{2}, \quad (\text{B.7})$$

де $\dot{x}_{pl}, \dot{x}_{pl}'$ - швидкості переміщення рідинної фази у початковому перерізі каналу $l_{\kappa,n}(t)$ (визначаються за допомогою рівнянь руху (4.20) для моменту часу $t = t_n + t_{il} + t_{nlx}$, $t = t_n + t_{il} + t_{nly}$.

З рівнянь (B.7) отримуємо

$$\dot{x}_{m1}' = \dot{x}_{pl}' = \dot{x}_{pl} \left(1 - \lambda_n(t) \frac{l_{\kappa,n}(t)}{d_{\kappa,n}(t)} - \zeta_p \right); \quad t = t_n + t_{il} + t_{nlx}$$

$$\dot{x}_{m1}' = \dot{x}_{pl}' = \dot{x}_{pl} \left(1 - \lambda_n(t) \frac{l_{\kappa,n}(t)}{d_{\kappa,n}(t)} - \zeta_p \right); \quad t = t_n + t_{il} + t_{nly}. \quad (\text{B.8})$$

Рівняння збереження імпульсу під час ударної взаємодії твердих частинок біля осі прес-форми відносно осей x, y записуємо у вигляді

$$m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} \dot{x}_{m1} = m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} \dot{x}_{m1}' + m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} \dot{x}_{m2}; \quad t = t_n + t_{il} + t_{nlx};$$

$$m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} \dot{x}_{m1} = m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} \dot{x}_{m1}' + m_m \frac{\rho_p(t)}{\rho_m(t)} \dot{x}_{m2}; \quad t = t_n + t_{il} + t_{nly}. \quad (\text{B.9})$$

З рівнянь (B.9) отримуємо

$$\dot{x}_{m2} = \dot{x}_{m1} - \dot{x}_{m1}'; \quad t = t_n + t_{il} + t_{nlx};$$

$$\dot{x}_{m2} = \dot{x}_{m1} - \dot{x}_{m1}'; \quad t = t_n + t_{il} + t_{nly}. \quad (\text{B.10})$$

Після описаної взаємодії частинок, внаслідок зближення мас m_I, m_{II} (див. рисунок 4.4, а) та витікання частини рідинної фази порції через отвори прес-форми, діаметр каналів між сусідніми твердими частинками дещо зменшується до величини $d_{\kappa,n} = d_{\kappa,n}(t_n + t_{il} + t_{nlz})$. При цьому для спрощення аналізу можна вважати його величиною постійною для всієї порції (див. підрозділ 4.3).

Параметри наступних послідовних ударних взаємодій твердих частинок верхніх шарів порції відносно осі z при проходженні першої прямої хвилі стискаючих напружень – другого і третього шарів, третього та четвертого і так до останнього k -го шару частинок, що прилягає до пуансона – визначаємо за допомогою рівнянь математичної моделі

досліджуваних процесів і обладнання (див. підрозділи 4.2, 5.3), а також з використанням формул

$$t_{n.i.z} = \sqrt{\frac{2 \cdot d_{\kappa.n}(t_{n.(i-1)z})}{\mathfrak{E}_{mz}}}; t = t_n + t_{il} + t_{n.(i-1)z}; i = 2 \div k;$$

$$\mathfrak{E}_{m(i+1)} = \mathfrak{E}_m - \mathfrak{E}_p; t = t_n + t_{il} + t_{n.i.z}; i = 2 \div k, \quad (\text{B.11})$$

де $t = t_n + t_{il} + t_{n.(i-1)z}$ – момент часу попередньої ударної взаємодії частинок.

Число шарів k твердих частинок, яке вважаємо незмінним для всього розглядуваного етапу циклу віброударного зневоднення визначаємо як (див. підрозділ 4.3)

$$k = \frac{H_M}{d_m + d_{\kappa.n}(t)}; t = t_n + t_{il}. \quad (\text{B.12})$$

Число шарів твердих частинок l між віссю та внутрішніми стінками прес-форми відносно осей x, y може відрізнятись від k (величина l і k залежить від розмірів порції H_m, D_m (див. рисунок 4.1)).

Тоді за аналогією з формулами (B.7) параметри наступних послідовних ударних взаємодій твердих частинок порції матеріалу відносно осей x, y при проходженні першої прямої хвилі дотичних напружень від осі до внутрішньої бокової стінки прес-форми визначаємо як

$$t_{n.i.x} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Sigma l_{\kappa.n}(t_{n.(i-1)x})}{\mathfrak{E}_{mx} \cdot n_p}}; t = t_n + t_{il} + t_{n.(i-1)x};$$

$$\mathfrak{E}_{m(i+1)} = \mathfrak{E}_m - \mathfrak{E}_p \left(1 - \lambda_n(t) \frac{l_{\kappa.n}(t)}{d_{\kappa.n}(t)} - \zeta_p \right); t = t_n + t_{il} + t_{n.i.x}; \quad (\text{B.13})$$

$$t_{n.i.y} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Sigma l_{\kappa.n}(t_{n.(i-1)y})}{\mathfrak{E}_{my} \cdot n_p}}; t = t_n + t_{il} + t_{n.(i-1)y};$$

$$\mathfrak{E}_{m(i+1)} = \mathfrak{E}_m - \mathfrak{E}_p \left(1 - \lambda_n(t) \frac{l_{\kappa.n}(t)}{d_{\kappa.n}(t)} - \zeta_p \right); t = t_n + t_{il} + t_{n.i.y}; i = 2 \div l,$$

де $t = t_n + t_{il} + t_{n.(i-1)x}$, $t = t_n + t_{il} + t_{n.(i-1)y}$ – моменти часу попередньої ударної взаємодії частинок.

Число шарів l твердих частинок від осі до стінок прес-форми відносно осей x , y , яке також буде незмінним для розглядуваного етапу циклу віброударного зневоднення обчислюємо як (див. підрозділ 4.3)

$$l = \frac{D_m}{2 \cdot \left(d_m + \frac{\Sigma l_{k.n}(t)}{n_p} \right)}; \quad t = t_n + t_{il}. \quad (\text{B.14})$$

Таким чином, створення на частинках порції вологого дисперсного матеріалу імпульсного силового навантаження $F_{mx\Sigma}(t)$, $F_{my\Sigma}(t)$, $F_{mzI}(t)$ призводить до виникнення в його середовищі хвиль дотичних та стискаючих напружень, що проходять від осі прес-форми до її бокових стінок і від днища прес-форми до пуансона (див. рисунок 4.4, а, г). Далі ці хвилі відбиваються від стінок прес-форми та пуансона і рухаються у зворотному напрямку.

Одночасно, в результаті створення на верхній поверхні порції матеріалу зусилля $F_{mzII}(t)$, від пуансона до днища прес-форми відходить пряма хвиля стискаючих напружень (див. підрозділ 4.1 та рисунок 4.4, а), яка у середніх перерізах порції накладається на зустрічну хвилю, що йде від днища до пуансона. Параметри коливань та ударних взаємодій твердих частинок порції, що передаються від пуансона до днища прес-форми можна визначити за допомогою рівнянь і залежностей (В.1 – В.4, В.11). При цьому у рівняння (В.1) замість $F_{mzI}(t)$ слід підставляти значення $F_{mzII}(t)$.

Аналіз формул (В.4, В.8, В.11, В.13) показує, що початкова швидкість твердих частинок порції матеріалу під час передачі ударних імпульсів від шару до шару відносно осей x , y , z поступово зменшується. Таким чином, хвилі напружень у середовищі порції будуть затухати. Те ж саме можна сказати й про вільні коливання твердих частинок, що ініціюються даними ударними імпульсами.

На II – IV-му етапах циклу віброударного навантаження внаслідок зміни швидкості виконавчих елементів у середовищі порції також будуть генеруватись хвилі дотичних та стискаючих прямих та зворотних напружень і деформацій (див. підрозділ 4.1 та рисунок 4.4). Але інтенсивність коливань твердих частинок, що ініціюються даними коливаннями, буде у порівнянні із I-м етапом нижчою, оскільки на цих етапах рушійна сила на нижньому виконавчому елементів вібропреса вже відсутня і прес-форма з пуансоном рухаються тільки під впливом сил власної інерції (див. рівняння 4.22, 4.24, 4.28). Параметри ударних взаємодій та коливань твердих частинок на II – IV-му етапах циклу можна

розрахувати, використовуючи відповідні рівняння руху (4.23, 4.25, 4.29) та формули даного додатку.

Власна частота твердих частинок під час їх коливань в процесі віброударного навантаження у прес-формі відносно осі z може бути наближено визначена за формулою [208]

$$v_m = \frac{\sqrt{\frac{c_{mz}}{m_m \cdot \rho_p / \rho_m} - \left(\frac{\alpha_{mz}}{2 \cdot m_m \cdot \rho_p / \rho_m} \right)^2}}{2 \cdot \pi}. \quad (\text{B.15})$$

Власна частота коливань нижнього виконавчого елемента вібропреса після його удару в момент повернення у вихідне нижнє положення наприкінці III-го етапу циклу віброударного навантаження (див. підрозділи 4.1 та 5.2) розраховується як [197]

$$v_I = \frac{1}{2 \cdot b_I} \sqrt{\frac{K_{cm}}{\rho_{cm}}}, \quad (\text{B.16})$$

де b_I – товщина вібростолу і днища прес-форми; K_{cm} , ρ_{cm} – модуль об'ємної пружності та густина матеріалу вібростолу та прес-форми (сталь).

Дані коливання нижнього виконавчого елемента вібропреса передаються порції матеріалу.

Розраховуємо за формулами (B.15, B.16) частоту v_m (для фізико-механічних параметрів концентрату кавового шламу з початковою вологістю $U_n = 75\%$, див. додаток Б) та частоту v_I (для конструктивних параметрів гідроімпульсного стенду-прототипу, див. рисунок 6.1, та додаток Б) отримуємо

$$v_m = \frac{\sqrt{\frac{49749,4}{0,47 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 / 162} - \left(\frac{0,0015}{2 \cdot 0,47 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 / 162} \right)^2}}{2 \cdot 3,14} = 20,85 \text{ кГц};$$

$$v_I = \frac{1}{2 \cdot 0,07} \sqrt{\frac{2,03 \cdot 10^{11}}{7800}} = 36,44 \text{ кГц}.$$

Отже під час кожного удару нижнього виконавчого елемента вібропреса на етапі його повернення у вихідне нижнє положення, у середовищі порції матеріалу у прес-формі генеруються високочастотні коливання. При цьому оскільки частота v_I даних збурень є значно вищою

за власну частоту ν_m твердих частинок середовища, останні у продовж розгону і приведення їх у стан коливання обов'язково проходять й через резонанс [208]. В результаті частинки одержують вищу рухомість, ефективно і рівномірно перерозподіляються по об'єму прес-форми з взаємними поворотами, зсувами, прослизанням, більш щільним укладанням та видаленням з проміжків між ними рідини. Таким чином, у порівнянні із статичним пресуванням підвищується продуктивність робочого процесу, зменшується його енергоємність, при забезпеченні досить низької кінцевої вологості концентрату оброблюваного матеріалу.

Додаток Г.

Розрахунок залежностей параметрів навантаження вологих дисперсних матеріалів під час їх попереднього віброударного зневоднення від конструктивних параметрів гідроімпульсного вібропреса

У пункті 2.2.2 та підрозділах 4.2, 5.3 встановлено, що основними параметрами навантаження вологих дисперсних матеріалів під час їх віброударного зневоднення на гідроімпульсному вібропресі (див. рисунок 5.1) є: амплітуда z_{1a} та частота ν коливань його вібростолу 12, а також максимальний тиск $p_{z.max}$ у порожнині гідроциліндра 5 ГП. За допомогою формул підрозділів 4.2, 4.3, 5.3 та складеної на їх основі у Microsoft Office Excel 2003 комп'ютерної програми були розраховані та побудовані графічні залежності вказаних параметрів навантаження від конструктивних параметрів гідроімпульсного вібропреса моделі ІВПМ-16 [64]: робочого об'єму W_a гідроаккумулятора 19, тиску відкриття p_l віброзбуджувача 33, величини попереднього стискання z_{0y} , пружин 4 повернення вібростолу 12, маси m_{II} верхнього виконавчого елемента та зусилля P_{cm} статичного притискання, створюваного допоміжним гідроциліндром 1 [5].

Нижче у таблиці Г.1 представлені, взяті з додатків А, Б, вихідні дані для розрахунку, а у таблиці Г.2 – розрахункові формули та величини одержаних за результатами розрахунку конструктивних параметрів гідроімпульсного вібропреса та вказаних вище параметрів навантаження, для певних заданих W_a , z_{0y} , m_{II} та P_{cm} .

Розрахункові графіки залежностей параметрів навантаження вологих дисперсних матеріалів під час їх попереднього віброударного зневоднення від конструктивних параметрів гідроімпульсного вібропреса наведені на рисунках 5.3 – 5.5 [5].

Таблиця Г.1 - Вихідні дані для розрахунку залежностей параметрів навантаження вологих дисперсних матеріалів під час їх попереднього віброударного зневоднення від конструктивних параметрів гідроімпульсного вібропреса

$c_{mz} = 49749,4 \text{ Н/м}$	$c_{pz} = 163880294 \text{ Н/м}$	$\alpha_{mz} = 0,0015 \text{ Па}\cdot\text{с}$	$\alpha_{pz} = 0,13 \text{ Па}\cdot\text{с}$
$\sigma_{0z} = 74 \text{ Н}$	$l_{0c} = 2,3 \text{ м}$	$d_{0c} = 0,015 \text{ м}$	$f_{0c} = 1,77 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$
$\lambda_{0c} = 0,025$	$f_{0z.m} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	$\lambda_{0z.m} = 0,025$	$l_{z.a} = 0,71 \text{ м}$
$d_{z.a} = 0,036 \text{ м}$	$f_{z.a} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$	$\lambda_{z.a} = 0,024$	$W_a = 2,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$
$d_a = 0,18 \text{ м}$	$S_a = 25,43 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$	$K_a = 1,69 \cdot 10^{10} \text{ Па}$	$\lambda_a = 0,024$
$m_{a.p} = 0,23 \text{ кг}$	$l_k = 0,165 \text{ м}$	$d_k = 0,025 \text{ м}$	$f_k = 4,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$
$K_k = 6,5 \cdot 10^{11} \text{ Па}$	$\lambda_k = 0,024$	$\zeta_{axl} = 1$	$l_l = 0,14 \text{ м}$
$d_l = 0,05 \text{ м}$	$f_l = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$	$K_l = 2,842 \cdot 10^{10} \text{ Па}$	$\lambda_l = 0,018$
$\zeta_{axz} = 0,75$	$l_3 = 1,5 \text{ м}$	$d_3 = 0,01 \text{ м}$	$f_3 = 7,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$
$K_3 = 1,1 \cdot 10^9 \text{ Па}$	$\lambda_3 = 0,025$	$l_4 = 2 \text{ м}$	$d_4 = 0,01 \text{ м}$

Продовження таблиці Г.1

$f_4 = 7,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$	$K_4 = 1,1 \cdot 10^9 \text{ Па}$	$\lambda_4 = 0,025$	$S_z = 1,65 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$
$S_{d.z} = 7,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$	$m_l = 125 \text{ кг}$	$m_{II} = 80 \text{ кг}$	$\lambda_{зв.д} = 1113,7$
$\zeta_{зв.д} = 6,79$	$c_y = 2,4 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$	$\lambda_{n.д} = 0,018$	$W_{n.д} = 1,57 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$
$p_1 = 11 \cdot 10^6 \text{ Па}$	$p_2 = 4 \cdot 10^6 \text{ Па}$	$p_n = 2 \cdot 10^6 \text{ Па}$	$p_0 = 101300 \text{ Па}$
$W_p = 99,997$	$W_z = 0,003$	$K_{d.z} = 3 \cdot 10^{10} \text{ Па}$	$K_{n.ф} = 10,93 \cdot 10^9 \text{ Па}$
$z_{0y} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$d_z = 0,145 \text{ м}$	$K_{зв.а.о} = 6,94 \cdot 10^8 \text{ Па}$	$t_8 = 10^{-3} \text{ с}$
$\rho_{p.p.t} = 836 \text{ кг/м}^3$	$K_{p.p} = 1,995 \cdot 10^9 \text{ Па}$	$Q_{n1} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$	$m_{к.p} = 0,023 \text{ кг}$
$m_{lp} = 0,076 \text{ кг}$	$\zeta_{зв.а.о} = 17,51$	$p_3 = 3280,5 \text{ Па}$	$K_{p.з} = 3,53 \cdot 10^6 \text{ Па}$
$K_{p.y1} = 1,99 \cdot 10^9 \text{ Па}$	$\alpha_z = 172,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$	$S_m = 0,0133 \text{ м}^2$	$t_3 = 9,39 \cdot 10^{-5} \text{ с}$
$f_{дp.8} = 0,15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$	$K_{p2} = 1,99 \cdot 10^9 \text{ Па}$	$\mu_{дp.8} = 0,67$	$W_8 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$
$\beta = 0,005$	$F_k = 8633 \text{ Н}$		

Таблиця Г.2 - Формули та результати розрахунку залежностей параметрів навантаження вологих дисперсних матеріалів під час їх попереднього віброударного зневоднення від конструктивних параметрів гідроімпульсного вібропреса

$E_{n.a} = \frac{Q_{n1} \cdot t_8 (p_1 + p_2)}{2} + \frac{(p_1^2 - p_2^2) W_{a.o}}{2 \cdot K_{зв.а.о}} \quad (4.35)$	216,2831412 Дж
$m_{a.o.p} = \frac{1}{3} f_{z.a}^2 \cdot \rho_{p.p.t} \left(\frac{l_{0c}}{f_{0c}} + \frac{l_{0z.m}}{f_{0z.m}} + \frac{l_{z.a}}{f_{z.a}} + \frac{W_a}{S_a^2} \right) \quad (5.4)$	1,144511867 кг
$\lambda_{зв.а.о} = \lambda_{0c} \frac{l_{0c}}{d_{0c}} + \lambda_{0z.m} \frac{l_{0z.m}}{d_{0z.m}} + \lambda_{z.a} \frac{l_{z.a}}{d_{z.a}} + \frac{1}{2} \lambda_a \cdot W_a \sqrt{\frac{\pi}{S_a^3}} \quad (5.5)$	0,098
$P1 = p_1 - p_3$	10996719,5 Па
$P2 = \frac{\rho_{p.p.t}}{2}$	418 кг/м ³
$P3 = \zeta_{ex1} \frac{f_1^2}{f_k^2} + \lambda_k \frac{l_k f_1^2}{f_k^3}$	145,3061224
$P4 = \zeta_{ex.z} + \lambda_l \frac{l_1}{f_1}$	2,035714286
$P5 = P2(P3 + P4)$	61588,88776
$EI = \frac{1}{2} \left[\frac{m_{a.o.p} f_1^2}{f_{z.a}^2} (1 + \lambda_{зв.а.о} + \zeta_{зв.а.о}) + \frac{m_{к.p} f_1^2}{f_k^2} \left(1 + \lambda_k \frac{l_k}{d_k} + \zeta_{ex1} \right) + m_{lp} (1 + P4) \right]$	41,93243063
$E2 = \frac{l_k f_k (K_{p.y1} + K_k)}{2 \cdot K_{p.y1} K_k}$	2,03763E-14

$E3 = \frac{l_1 f_1 (K_{p.y1} + K_1)}{2 \cdot K_{p.y1} K_1}$	7,37723E-14
$E4 = E2 \cdot P2^2 \cdot P3^2 + E3 \cdot P5^2$	0,000355003
$E5 = E1 - 2 \cdot E2 \cdot P1 \cdot P2 \cdot P3 - 2 \cdot E3 \cdot P1 \cdot P5$	41,80528289
$E6 = E2 \cdot P1^2 + E3 \cdot P1^2 - E_{n.a}$	-204,8979577
$v_{1p} = \sqrt{\frac{-E5 + \sqrt{E5^2 - 4 \cdot E4 \cdot E6}}{2 \cdot E4}}$	2,213829623 м/с
$\Delta p_{y\partial.k} = P1 - P2 \cdot P3 \cdot v_{1p}^2 \quad (5.8)$	10862256,01 Па
$\Delta p_{y\partial l} = P1 - P2 \cdot v_{1p}^2 (P3 + P4) \quad (5.8)$	10694869,8 Па
$m_{II3\delta} = m_{II} + \frac{1}{3} \rho_{p.p.t} \cdot S_2^2 \left(\frac{W_{n.\partial}}{S_{\partial.z}^2} + \frac{l_4}{f_4} + \frac{l_3}{f_3} \right) \quad (5.21)$	80,51407033 кг
$E7 = m_{1p} \frac{d_z^4}{d_1^4} \quad (5.17)$	0,076 кг
$E8 = E7 \frac{v_{1p}^2}{2}$	0,186239581
$E9 = \frac{l_1 \cdot f_1 (K_{p.y1} + K_1)}{2 \cdot K_{p.y1} \cdot K_1}$	7,37723E-14
$E10 = E9 \cdot \Delta p_{y\partial l}^2$	8,438094505
$E11 = m_I + m_{II3\delta} (1 + \lambda_{3\delta.\partial} + \zeta_{3\delta.\partial})$	753,64 кг
$E12 = \frac{S_2^2}{2 \cdot f_1^2} (E11 + E7)$	26707,51523
$E13 = \frac{c_y \cdot z_{0y}^2}{2}$	4,8
$E14 = \frac{t_3 S_2}{2}$	7,74675E-07
$E15 = E13 \cdot t_3$	0,00045072
$E16 = \frac{E14}{E11}$	1,02791E-09
$E17 = \frac{E15}{E11}$	5,98057E-07
$E18 = E12 \cdot E16^2 + E9$	1,01992E-13
$E19 = 2 \cdot E12 \cdot E16 \cdot E17$	3,28369E-11
$E20 = E12 \cdot E17^2 + E13 - E8 - E10$	-3,824334076

$\Delta p_{y\partial 11} = \frac{E19 + \sqrt{E19^2 - 4 \cdot E18 \cdot E20}}{2 \cdot E18}$	6123607,13 Па
$v_{In} = \frac{E14 \cdot 5600 \cdot \Delta p_{y\partial 11} - E15}{E11}$	35,24933593 Гц
$p_{z.max} = \Delta p_{y\partial 11} + p_3 \quad (5.45)$	6126887,63 Па
$K_{p.cp} = \frac{K_{p2} + K_{p3}}{2}$	996765000 Па
$\Delta W_6 = \frac{W_6(p_2 - p_3)}{K_{p.cp}} \quad (5.53)$	1,20291E-07 м ³
$t_{n.m} = \frac{\Delta W_6}{f_{\partial p.6} \mu_{\partial p.6}} \sqrt{\frac{\rho_{p.p.t}}{2(p_2 - p_3)}} \quad (5.54)$	0,012240591 с
$t_{h.m} = \frac{2 \cdot E_{n.a}}{Q_{H1}(p_1 + p_2)} \quad (4.11)$	0,026216138 с
$v = \frac{l}{t_6 + t_{n.m} + t_{h.m}} \quad (5.52)$	25,34421924 Гц
$K_{p.\partial} = \frac{K_{p.p} \left(\frac{W_p}{W_2} + 1 \right)}{\frac{W_p}{W_2} + K_{p.p} \frac{p_0}{p_H^2}} \quad (4.15)$	1992040423 Па
$R_{\partial.2} = 0,1 \cdot S_2 \Delta p_{y\partial 11} \quad (5.30)$	10103,95176 Н
$P_{cm} = p_H \cdot S_{\partial.2}$	15700 Н
$c_{n.\partial.36} = \frac{S_{\partial.2}^2 \cdot K_{p.\partial} \cdot K_{\partial.2}}{W_{n.\partial} \cdot (K_{p.\partial} + K_{\partial.2})} \quad (5.28)$	73319099,6 Н/м
$c_{436} = \frac{S_{\partial.2}^2 \cdot K_{p.\partial} \cdot K_4}{l_4 \cdot f_4 \cdot (K_{p.\partial} + K_4)} \quad (5.28)$	278154013,2 Н/м
$c_{336} = \frac{S_{\partial.2}^2 \cdot K_{p.\partial} \cdot K_3}{l_3 \cdot f_3 \cdot (K_{p.\partial} + K_3)} \quad (5.28)$	370872017,6 Н/м
$c_{\partial.36} = \frac{l}{\frac{l}{c_{n.\partial.36}} + \frac{l}{c_{436}} + \frac{l}{c_{336}}} \quad (5.27)$	50174382,47 Н/м
$\alpha_{\partial.2} = 2 \cdot \beta \sqrt{c_{\partial.36} m_{II36}} \quad (5.26)$	635,589785 Па·с

$F_{mz\Sigma max} = m_{II} \left(\frac{\sqrt{2E_{n.a}c_y}}{m_I + m_{II}} + g \right) \quad (4.35)$	13357,84432 Н
$\Delta p_{3.cpl} = \frac{F_{mz\Sigma max} + P_{cm} + m_{II36} \cdot g}{2}$	14923,4411 Па
$Z1 = \frac{K_{p.d}}{2} \left(\frac{S_{\partial.2}}{W_{n.d} + l_4 \cdot f_4 + l_3 \cdot f_3} \right)^2 \times$ $\times \left(\frac{W_{n.d} (K_{p.d} + K_{\partial.2})}{K_{\partial.2}} + \frac{l_4 \cdot f_4 (K_{p.d} + K_4)}{K_4} + \frac{l_3 \cdot f_3 (K_{p.d} + K_3)}{K_3} \right)$	44125318,31
$Z2 = m_I g$	1225 Н
$Z3 = m_{II36} g$	789,0378893 Н
$Z4 = c_y z_{0y}$	4800 Н
$Z5 = \frac{c_y}{2}$	1200000
$Z6 = v_{In} \alpha_2$	6066,410713
$Z7 = v_{In} \alpha_{\partial.2}$	22404,11787
$Z9 = \frac{E7v_{1p}^2}{2}$	0,186239581
$Z10 = Z9 + E10 - E9 \cdot \Delta p_{y\partial 11}^2 - \frac{v_{In}^2 \cdot E11}{2} - E13$	-468203,7018
$Z11 = \sigma_m + Z6 + Z7 + Z2 + Z3 + Z4 + R_{\partial.2} + P_{cm}$	61202,2146
$Z12 = Z5 + Z1$	45325318,31
$z_{In} = \frac{-Z11 + \sqrt{Z11^2 + 4 \cdot Z12 \cdot Z10}}{2 \cdot Z12}$	9,64394E-4 м
$\Delta p_{m.max} = \frac{\left(p_{2.max} \cdot S_2 - c_y (z_{0y} + z_{In}) - \alpha_2 v_{In} - \frac{(m_I - m_{II36}) v_{In}}{t_3} + \right.}{S_m} \left. + (\lambda_{36\partial} + \zeta_{36\partial}) v_{In}^2 + \alpha_{\partial.2} \cdot v_{In} + c_{\partial.36} \cdot z_{In} + R_{\partial.2} + 2 \cdot P_{cm} \right) \quad (5.46)$	828724,3491 Па
$a_I = \frac{\left(\alpha_2 \cdot v_{In} + c_y (z_{0y} + z_{In}) + (\lambda_{36\partial} + \zeta_{36\partial}) v_{In}^2 + \right.}{2 \cdot m_I +} \left. + \alpha_{\partial.2} \cdot v_{In} + c_{\partial.36} \cdot z_{In} + R_{\partial.2} - S_2 (p_{2.max} + p_2) \right) \quad (5.51)$ $+ \frac{m_{II36} g + P_{cm}}{m_I} + g;$	9,44914 м/с ²

Продовження таблиці Г.2

$z_{I\delta} = \frac{v_{In}^2}{2 \cdot a_I} \quad (5.50)$	6,2388E-4 м
$z_{Ia} = z_{In} + z_{I\delta} \quad (5.49)$	1,588274E-3 м

Наукове видання

І.В. Севостьянов

**ТЕХНОЛОГІЯ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ
ВІБРОУДАРНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ
ВОЛОГИХ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ
Монографія**

Викладено в авторській редакції

Підписано до друку 3.04.2020. Формат 60x84/16
Папір офсетний. Друк лазерний
Ум.друк.арк. 17,61. Тираж 100 прим. Зам. 250

Відруковано у редакційно-видавничому відділі
Вінницького національного аграрного університету
м.Вінниця, вул. Сонячна,3, 21008
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців,
виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК №5009 від 10.11.2015