

**Веселовська Н. Р.**  
д.т.н., професор

**Брацлавець Б. С.**  
аспірант

*Вінницький національний  
аграрний університет*

**Іскович-Лотоцький Р. Д.**  
д.т.н., професор

**Шевченко В. В.**  
магістр

*Вінницький національний  
технічний університет*

**Veselovska N.**  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor

**Bratslavets B.**  
postgraduate student

*Vinnitsia National Agrarian  
University*

**Iskovich-Lototsky R.**  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor

**Shevchnko V.**  
master's student

*Vinnitsa National Technical  
University*

**УДК 621:638.562**

**DOI: 10.37128/2306-8744-2022-2-6**

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗОНДУВАННЯ ҐРУНТІВ НА УСТАНОВКАХ З ГІДРОІМПУЛЬСНИМ ПРИВОДОМ**

Дослідження ґрунтів зануренням конуса під впливом УВЗ є одним з експрес-методів отримання інженерно-геологічної інформації про фізико-механічні властивості фундаменту з сипких ґрунтів будівель і споруд. Воно дозволяє виявляти ступінь однорідності зондованих ґрунтів; визначати положення меж (контактів) різних літологічних прошарків і несучих прошарків для пальної основи; виявляти і окреслювати в плані і по глибині послаблені зони на досліджуваних ділянках для точної прив'язки місця проведення дослідних робіт; вибирати оптимальні варіанти вибору молотів; оцінювати фізичні і механічні властивості піщаних ґрунтів (щільність, кут внутрішнього тертя тощо); орієнтовно оцінювати модуль деформації піщаних ґрунтів.

Метою роботи є підвищення ефективності, швидкодії а також можливість регулювання процесу зондування ґрунтів шляхом розробки і використання установок з гідроімпульсним приводом.

Основними задачами є розробка, дослідження та розрахунок основних параметрів установок з гідроімпульсним приводом для зондування ґрунтів.

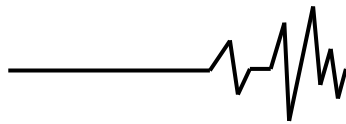
Об'єктом дослідження є процес зондування ґрунтів. Предмет дослідження – гідроімпульсний привод установки для зондування ґрунтів.

Досвід показав, що ефективне застосування польових методів можливо тільки за умови методично правильного підходу до складання і виконання програм всього комплексу вишукувальних робіт. Різні аспекти проблеми комплексного дослідження ґрунтів польовими методами розроблялися і поглиблювалися поступово. До основних методів дослідження входить аналіз відомостей щодо існуючих методів та установок для розпилення порошків вольфраму, математичне моделювання процесів в шпиндельному вузлі установки для розпилення порошків металів з урахуванням його конструкційних особливостей і режимів роботи на основі нелінійних диференціальних рівнянь теплопередачі від твердого та рідинного тіла з використанням числових методів їх розв'язання на основі програми FlowVision.

**Ключові слова:** комплекс, функціональні можливості, обладнання, процес обробки.

**Вступ.** Дослідження ґрунтів зануренням конуса під впливом УВЗ є одним з експрес-методів отримання інженерно-геологічної інформації про фізико-механічні властивості фундаменту з сипких ґрунтів будівель і споруд. Воно дозволяє виявляти ступінь однорідності зондованих ґрунтів; визначати положення меж (контактів) різних літологічних прошарків і несучих

прошарків для пальної основи; виявляти і окреслювати в плані і по глибині послаблені зони на досліджуваних ділянках для точної прив'язки місця проведення дослідних робіт; вибирати оптимальні варіанти вибору молотів; оцінювати фізичні і механічні властивості піщаних ґрунтів (щільність, кут внутрішнього тертя тощо);



орієнтовно оцінювати модуль деформації піщаних ґрунтів.

**Основні тенденції створення ударно-вібраційного обладнання з різними типами приводів для зондування ґрунтів.** Складовим елементом проектно-кошторисної справи в будівництві є інженерно-геологічні вишукування. За останні роки в практику інженерно-геологічних вишукувань наростаючими темпами впроваджуються польові методи досліджень фізико-механічних властивостей ґрунтів.

Тенденція до застосування комплексу польових методів при вивченні фізико-механічних властивостей ґрунтів стала проявлятися приблизно з середини 50-х років, коли в практику інженерно-геологічних вишукувань стали впроваджуватися різні польові методи досліджень ґрунтів, в тому числі динамічне і статичне зондування, радіоактивний каротаж, камуфлетного вибухи і ін. Досвід показав, що ефективне застосування польових методів можливо тільки за умови методично правильного підходу до складання і виконання програм всього комплексу вишуквальних робіт. Різні аспекти проблеми комплексного дослідження ґрунтів польовими методами розроблялися і поглиблювалися поступово.

Ідея комплексування польових методів розвивалася в двох напрямках: шляхом паралельного застосування різних методів в межах досліджуваної майданчики і шляхом створення комбінованих установок, що дозволяють одночасно досліджувати ґрунти на одній вертикалі різними методами.

Подібні класифікації мають певне значення, проте при інженерно-геологічному дослідженні ґрунтів комплексом польових методів доцільніше базуватися на більш повній і більш загальній класифікації, яка визначає можливість і доцільність застосування комплексів польових методів в різних «масштабах»: від двох-трьох видів польових методів однієї підгрупи або декількох методів різних підгруп і груп до об'єднання різних класів і типів польових методів. В даній роботі немає необхідності зупинятися на докладній характеристиці окремих польових методів. Разом з тим доцільно звернути увагу на деякі особливості хоча б кількох, найбільш поширених методів, які необхідно враховувати при їх комплексному використанні в практиці інженерно-геологічних вишукувань.

Перш за все, слід розглянути характер дослідження ґрунтів польовими методами по глибині досліджуваного ділянки. Для переважної більшості польових методів характерна уривчастість досліджень. Так, відбір проб ґрунту з бурових свердловин, радіометричні вимірювання, випробування ґрунтів штампами, пресиометрами і багатьма іншими методами здійснюються поінтервального (рис. 1, а, б). При цьому відстані

між горизонтами розвідки, випробування і випробування ґрунтів становлять кілька десятків сантиметрів, а іноді і кілька метрів. При цьому в певних умовах створюється небезпека пропуску прошарку з властивостями, що відрізняються від властивостей оточуючих ґрунтів.

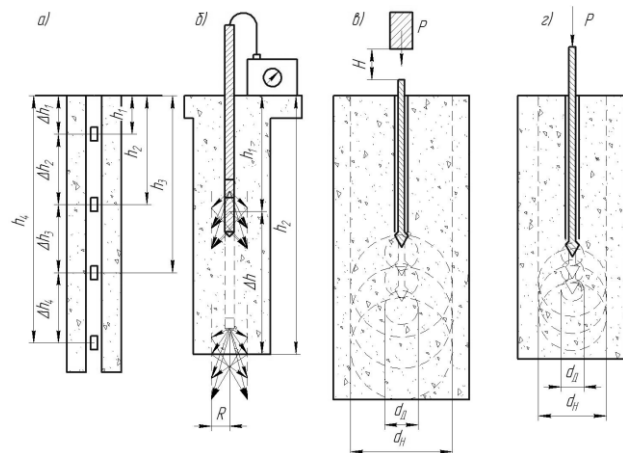
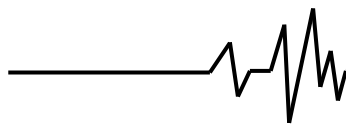


Рис. 1. Схеми, що ілюструють різні методи вивчення ґрунтів: а – прохід свердловини з відбором зразків; б – радіоактивний каротаж; в – динамічне зондування; г – статичне зондування.

Умовні позначення:  $H$  - глибина відбору зразків або радіоактивних вимірювань;  $\Delta h$  - інтервали глибини випробування ґрунту;  $R$  - глибинність радіо-ізопоного методу;  $d_d$  - діаметр зони деформації і руйнування структури ґрунту;  $d_n$  - діаметр зони зміни напруженого стану ґрунту.

Різний обсяг досліджуваного ґрунту характерний практично для всіх польових методів, в тому числі і для методів зондування. При цьому важливо враховувати але тільки обсяг зони деформування ґрунту, але і розміри зони зміни напруженого стану ґрунту, що грає істотну роль, наприклад, при призначенні зони осереднення даних випробувань ґрунтів для встановлення кореляційних залежностей між показниками випробувань ґрунтів різними методами. Як відомо, існують різні польові методи і методики вивчення одних і тих же властивостей ґрунтів.

Визнаючи прогресивність методу вибухового зондування, треба відзначити, що поставлені вище питання можуть бути дозволені тільки на основі спільного дослідження ґрунтів комплексом польових і лабораторних методів. Метод польового опису та документації ґрунтів, строго кажучи, є обов'язковим при проведенні інженерно-геологічних вишукувань, але іноді недооцінюється, тому або не включається в програму робіт, які роботи проводяться недостатньо детально і ретельно. Значення ж цих даних важко переоцінити: в ряді випадків тільки на їх основі виявляється можливим правильно проінтерпретувати результати випробувань



ґрунтів, простежити за схильністю ґрунтів так званому додатковому вивітрюванню.

Поява і розвиток ударно-вібраційного зондування як нового методу дослідження ґрунтів було обумовлено розвитком і широким впровадженням у виробництво динамічного (ударного) зондування, а також розвитком ударно-вібраційного способу буріння інженерно-геологічних свердловин.

Ударно-вібраційне зондування ґрунтів можна здійснювати за допомогою будь-яких установок і агрегатів, оснащених ударно-вібраційних або ударним пристроєм для занурення різних елементів в ґрунти. Зазвичай в таких установках використовуються молоти, віброзанурювачі та вібромолоти з різними типами приводів, проте здебільшого це вібромолоти ще радянського виробництва з дебалансними приводами.

В якості основного інструменту при ударно-вібраційному зондуванні ґрунтів використовуються бурильні труби і конічний наконечник.

Принципово для ударно-вібраційного зондування можна використовувати стандартний інструмент для динамічного зондування (по СН 448-72). Однак цей інструмент слід застосовувати тільки в комплекті з вібромолотом невеликої потужності.

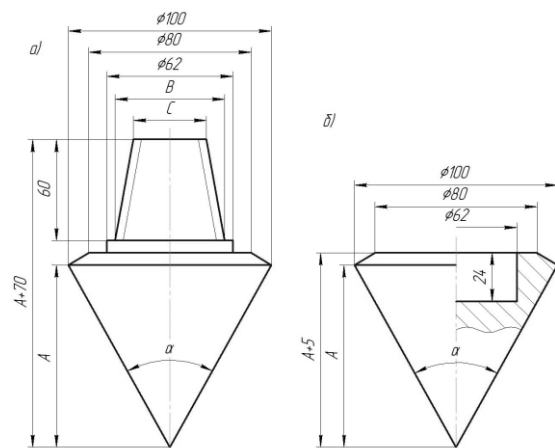


Рис. 2. Інвентарний (а) і знімний (б) конічні наконечники для ударно-вібраційного зондування ґрунтів

**Класифікація вібромолотів** проводиться по виду застосовуваного приводу а також за наявністю пружного зв'язку між віброзбудувачем і занурюваним елементом. Класифікаційна схема вібромолотів представлена на рис 3. Вібромолоти відрізняються від віброзанурювачів способом з'єднання корпусу віброзбудника з наголовником через пружинні амортизатори, які дозволяють корпусу віброзбудника здійснювати коливання з великими розмахами, відриваючись від наголовника і б'ючи бойком по ковадлу при зворотному русі.

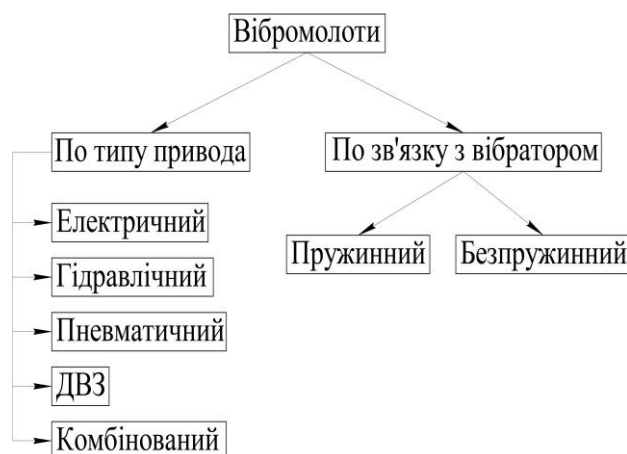


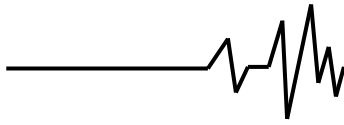
Рис. 3. Схема класифікації вібромолотів

Молоти складаються з масивної ударної частини, що рухається поступально щодо направляючої конструкції у вигляді циліндра (труби), поршня зі штоком, штанг тощо. Ударна частина молота завдає чергуються удари по голівці палі і занурює палю в ґрунт. Напрямна частина молота забезпечена пристроєм для закріплення і центрування молота на палі.

Віброзанурювачі за формою порушуваних коливань підрозділяються на машини поздовжнього і поздовжньо-обертального дії; за схемою пристрою - на машини найпростішого типу і з підресореним навантаженням; по виду використовуваної енергії - на машини з електричним і гідравлічним приводом; за наявністю трансмісії - на трансмісійні (між двигуном і дебалансними валами є передача) і безтрансмісійні (вали двигунів є дебалансними валами); за призначенням і області застосування - на високочастотні і низькочастотні віброзанурювачі.

Основними перевагами низькочастотних віброзанурювачів в порівнянні з ударними засобами занурення є також більш високі швидкості занурення (в слабких ґрунтах і ґрунтах середньої щільності), простота і зручність управління, менш складне допоміжне обладнання.

Матеріал палі при вібраційному зануренні, не наражаючись ударних навантажень, відчуває значно менші напруги, що дозволяє застосовувати віброзанурювач для занурення тонкостінних залізобетонних оболонок на велику глибину. Віброзанурювач можна використовувати при зануренні палі поблизу споруд без побоювання порушити їх цілісність, так як навколишній ґрунт коливається в цьому випадку менше, ніж при ударному зануренні. Крім того, віброзанурювачі працюють практично безшумно. Основний недолік віброзанурювачів цього типу полягає в тому, що вони можуть ефективно працювати лише в слабких водонасичених незв'язаних або слабозв'язних ґрунтах. У щільних ґрунтах, наприклад в глинах, їх занурює здатність різко



знижується, а іноді занурення стає неможливим. Маса елемента, занурюваного вібраційним способом, практично не обмежується. Відомий досвід вібраційного занурення колодце-оболонки з силою тяжіння понад 200 кН. При ударно-вібраційному зануренні сила тяжіння занурюваного елемента, як правило, не повинна перевищувати 3-5 кН, так як для найбільш ефективного занурення цим методом в умовах значного лобового опору відношення занурюваного елемента і ударної частини вібромолота має наближатися до одиниці; застосування вібромолотом з силою тяжіння ударної частини, що перевищує 3-5 кН, обмежується довговічністю механізму, різко знижується зі збільшенням маси ударної частини.

Машини, що передають занурюється елементу або якого-небудь робочого органу ударні імпульси (при ударі віброзбуджувача) і вібрацію (через пружне з'єднання віброзбуджувача з занурюваним елементом), називаються віброударними механізмами, а палезанурювані машини ударної дії - вібромолотом. Вібромолоти можуть бути класифіковані: по наявності пружного зв'язку між віброзбуджувачем і занурюваним елементом - на безпружинні (вільні) і пружинні; по зв'язку двигуна з віброзбуджувачем - на трансмісійні та безтрансмісійні; по виду приводу - на електричні, гідравлічні, з двигуном внутрішнього згоряння; за типом віброзбуджувача - на машини з двохвальним збуджувачем і з одновальним. Віброударні машини вигідно відрізняються від вібраційних здатністю до самоналаштування, тобто можливістю в якійсь мірі підвищувати енергію удару при збільшенні опору середовища і, отже, зменшення податливості, наприклад, занурюваного елемента. Це пояснюється тим, що на режим роботи віброударної машини сильно впливає коефіцієнт відновлення швидкості при ударі, що є відношенням швидкості віброзбуджувача після удару до швидкості до удару і залежить в свою чергу від співвідношення мас співударних елементів; при зануренні в ґрунт маса елемента зростає із заглибленням (в зв'язку з ростом приєднується маси ґрунту); це тягне за собою збільшення коефіцієнта відновлення і, отже, енергії удару і в кінцевому підсумку дозволяє використовувати віброударний механізм з більшою ефективністю.

Вібромолоти передають занурюваним елементам як вібраційні, так і ударні імпульси і забезпечують занурення в щільні ґрунти металевих шпунтів довжиною до 13 м, металевих паль і труб довжиною до 20 м. Конструкції вібромолотом мають мало відмінностей. Деякі типи молотів можуть працювати як в ударному, так і в безударному режимах в залежності від жорсткості пружної системи, параметрів вібратора, опору ґрунту зануренню тощо.

Вібромолоти використовують також для занурення залізобетонних паль в однорідні водонасичені ґрунти і вилучення з ґрунту труб, паль і шпунта.

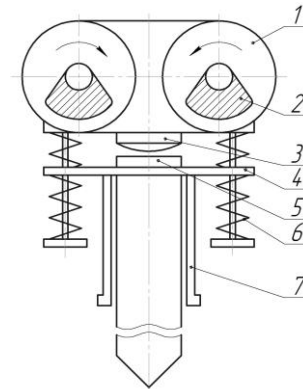


Рис. 4. Принципова схема вібромолота

Основними елементами вібромолота є підпружинена ударна частина, нижня навантажувальна плита і наголовник. Ударна частина являє собою (рис. 4) двохвальний безтрансмісійний віброзбуджувач 1 спрямованих вертикальних коливань з ударником 3. У корпусі віброзбуджувача змонтовані два електродвигуни, на паралельних валах яких, синхронно обертаються в різних напрямках, закріплені дебаланси 2 з регульованим статичним моментом. Ударна частина і нижня плита 4 з ковзальним 5 з'єднані між собою робочими пружинами 6. Наголовники 7 з'єднуються з занурюваним елементом жорстко або надаються на нього вільно без закріплення.

Досвід показує, що більш високочастотні вібромолоти мають більш вузьку сферу застосування, оскільки забезпечують ефективне занурення шпунтів і інших елементів з малим лобовим опором лише в слабких ґрунтах. У щільних ґрунтах більш ефективними є машини, що розвивають значну енергію удару. На рис. 5.4 представлений ряд відомих схем вібромолотом.

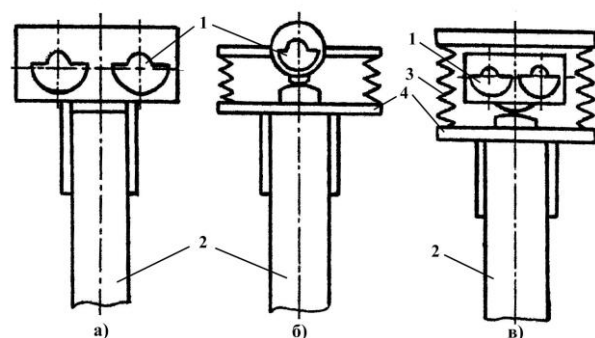
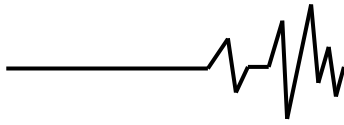


Рис. 5 – Принципові конструктивні схеми вібромолотів

Зображений на рис. 5, а вібромолот є безтрансмісійним безпружинним з двохвальним віброзбуджувачем 1 спрямованої дії, вільно



встановлюються на палю 2. Двосторонньої зв'язку між вібратором і палею немає, при цьому вібратор вільний також від зовнішніх зв'язків. Практично він складається з двох електродвигунів, вбудованих в загальний жорсткий корпус. На кінцях валів закріплюються дебаланси. За характером впливу на занурюваної елемент розглянутий ударно-вібраційний занурювач є високочастотний молот. Основна перевага таких вібромолотом - простота конструкції і, що особливо важливо, легка і зручна настройка, яка в основному забезпечується встановленням правильного співвідношення між силою тяжіння вібратора  $G$  і амплітудою вимушеної сили  $P$ . Для найбільш ефективного і стійкого режиму роботи навантажувача цілком достатнім є те, щоб відношення  $G/P$  було рівне 0,4-0,5. Недоліком є неможливість самостійно управляти масою занурюваної системи. Занурювач не має амортизатора, який міг би служити опорою для навантажувача, жорстке ж з'єднання останньої з палею або з вібратором недоцільно. До недоліків також відноситься відсутність можливості забезпечити нормальні умови для роботи електродвигунів, які доводиться вбудовувати в вібратор. У цих умовах домогтися довговічної роботи двигунів дуже важко.

На рис. 5, 6 представлена схема безтрансмісійним пружинного вібромолота з одновальним вібробуджувачем кругового дії, які мають в порівнянні з двохвальним вібромолотами меншу масу і більш просту конструкцію.

**Обґрунтування вибору параметрів гідроімпульсного приводу установки при зондування ґрунтів.** Основою споруди служить масив ґрунту, що сприймає навантаження від споруди. У тих випадках, коли в якості основ служать ґрунти в умовах їх природного залягання, такі основи називаються природними. Ґрунти, попередньо ущільнені відповідними способами, називаються штучними.

Для правильного вирішення питань пов'язаних з вибором палебійного обладнання для влаштування основ і фундаментів будівель і споруд необхідно знати основні характеристики ґрунтів.

Ґрунтами називають гірські породи, що залягають у верхніх шарах земної кори і використовуються в будівельних цілях при виконанні різних інженерних робіт. Ґрунти, які використовують в якості основ для будівель і споруд, поділяють на скельні, напівскельні, великоуламкові, піщані і глинисті.

До скельним ґрунтів відносять граніти, пісковики, ракушники, вапняки та інші породи. При відсутності зовнішніх впливів подібного роду масивні скельні породи являють собою найбільш міцні підстави для всіх будівель і споруд.

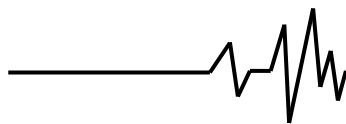
Ґрунтова вода, впливаючи на гіпс, вапняки, мергелі, утворює в їх масивах тріщини і порожнечі або викликає карстові явища. Великоуламковими називають незцементовані ґрунти, що містять за масою більше половини уламків кристалічних або осадових порід. До цієї групи ґрунтів відносять щебеневу (галечникову) і дерев'яний (гравійний). Такі ґрунти не змінюють своїх фізичних властивостей при зволоженні, слабо стискаються під навантаженням, роблять значний опір зсуву і слабо розмиваються водою.

До піщаним відносять такі ґрунти, які в сухому стані стають сипучими, не володіють властивістю пластичності і містять менше половини по масі частинок більше 2 мм. Залежно від зернового складу піщані ґрунти (піски) підрозділяють на великі, середні, дрібні і дуже дрібні. За мінералогічним складом розрізняють кварцові, сланцеві і вапнякові піски. Найміцніші - кварцові піски. Гранулометричний (зерновий) склад ґрунту показує відносний вміст в ньому твердих частинок різної крупності, яке виражається у відсотках від загальної маси досліджуваного ґрунту. Гранулометричний склад встановлюють аналізом, при якому тверді частинки ґрунту поділяють по крупності на окремі групи.

Тверді частинки ґрунту (скелет) складаються з зерен двох основних видів: компактної форми (піщані ґрунти) та пластичної форми (глинисті ґрунти). Зазначені види зерен впливають на фізико-механічні властивості ґрунтів. Ступінь цього впливу залежить від процентного вмісту даного виду зерен в складі ґрунту.

Одним з головних функціональних механізмів, що визначають продуктивність і надійність роботи вібраційних пристроїв у цілому, є вібробуджувач, що слугує для отримання певного закону коливань робочого органу.

Аналіз конструкцій вібромеханізмів з різними типами приводів дозволив зробити висновок, що найбільш повно задовольняють вимоги вібробуджувачі з гідроприводом, завдяки яким удалося істотно розширити сферу технічного застосування вібрацій, у тому числі при вібраційному різанні металів, тому що за допомогою гідравлічних вібробуджувачів можна найбільш раціонально вирішувати такі завдання, які застосуванням інших типів вібробуджувачів вирішувати не вдається. Дослідження закономірностей розвитку вібраційного обладнання з різними типами приводів показало, що напрямок його розвитку визначається видом генератора механічних коливань (вібрацій) робочої ланки чи вібробуджувача. Вібробуджувач є основним вузлом будь-якої вібраційної машини і визначає ступінь її досконалості, надійності, функціональні можливості, вартість та інші техніко-економічні показники.



Наведений нижче аналіз дозволяє зробити висновок, що в зв'язку з широким розвитком вібраційної техніки, не всі існуючі типи віброозбуджувачів можуть задовольняти перераховані вимоги. Особливо великі труднощі пов'язані з підвищенням питомої потужності, (вантажопідйомності) віброозбуджувачів.

За типом привода сучасні віброозбуджувачі можна поділити на механічні, електричні, пневматичні, гідравлічні, комбіновані. За принципом дії гідравлічні віброозбуджувачі підрозділяються на такі основні типи: пульсаторні, слідкуючі, автоколивальні, самокеровані (рис. 6).

В автоколивальних гідравлічних системах збуджувальне періодична сила створюється спеціальним пристроєм, що автоматично здійснює подачу й відвід робочої рідини при живленні від магістралі постійного тиску.

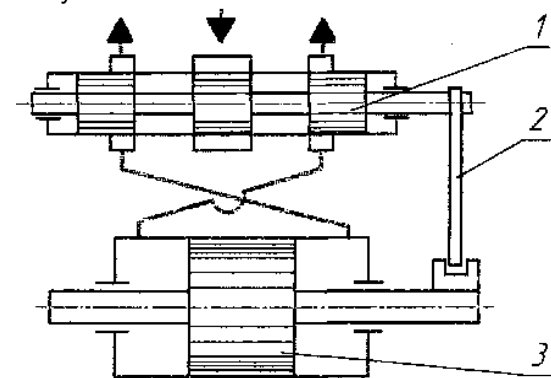


Рис. 6. Принципова схема автоколивального гідровібратора

Створення АГВ об'ємного типу із клапанним розподільником у наш час перебуває на стадії дослідно-промислових зразків. Деякі з перспективних конструкцій віброозбуджувачів такого типу й технологія їхнього виготовлення, що відповідають специфічним умовам роботи вібромашин, наприклад, вібропривод формувальних машин, розроблені недостатньо, теорія й методи розрахунку не набули завершеної форми й не відповідають технічному інженерному рівню. Заслужують уваги гідравлічні віброозбуджувачі зі спеціальним генератором коливань — автоматичним пристроєм керування тиском (клапан-пульсатором), не зв'язаним безпосередньо з виконавчим механізмом. Аналіз відомих конструкцій таких віброозбуджувачів показав, що незважаючи на їхнє різноманіття, для керування розподільчим пристроєм використовується принцип зворотного зв'язку за тиском.

Одна із схем гідравлічного вібраційного привода з клапаном-пульсатором показана на рис. 7.

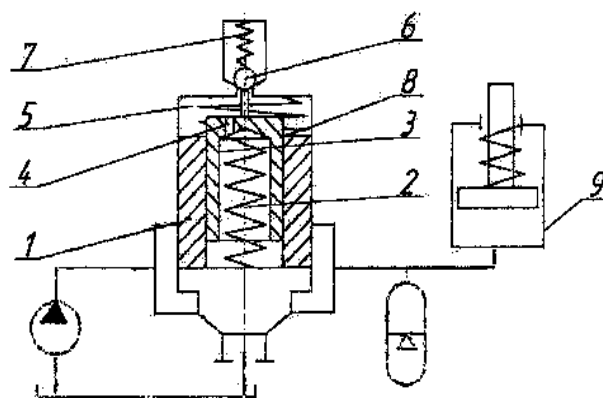


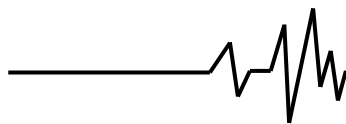
Рис. 7. Схема гідравлічного вібраційного привода з клапаном-пульсатором: 1 - клапан другого каскаду 2 - пружина; 3 - штовхач; 4 - отвір дросельний; 5 - порожнина надклапанна; 6 - кулька; 7 - пружина; 8 - пружина; 9 - порожнина циліндра

У цій схемі для досягнення автоматичного керування циклом руху робочого органа використовується двокаскадний клапан-пульсатор з кульковим запірним елементом першого каскаду й конічним — другого каскаду, що відокремлює порожнину нагнітання від зливної магістралі. Принцип роботи полягає в тому, що від насоса масло надходить у робочу порожнину плунжерного циліндра 9 і по каналах, виконаних у тілі другого каскаду 1, через дросельний отвір 4 у штовхачі 3 у надклапанну порожнину 5. Результати досліджень показали, що в гідросистемі із клапаном-пульсатором запропонованої конструкції має місце режим автоколивань, причому на амплітуду й частоту автоколивань істотний вплив мають геометричні параметри самого клапана-пульсатора й виконавчого механізму.

Простота конструкції, широкий діапазон регулювання вібраційних параметрів, відсутність ущільнень у поступальних парах забезпечують таким віброозбуджувачам застосування в різних технологічних вібромашинах. розподільного пристрою і його зв'язком з виконавчим механізмом.

Розглянемо деякі з конструкцій ВГВ, які за принципом дії аналогічні представленим вище схемі, однак вузол автоколивань (клапан-пульсатор) вмонтований у виконавчий механізм, що дозволило спростити конструкцію віброозбуджувача й зменшити його габарити.

Конкретним прикладом розміщення клапана-пульсатора у виконавчому механізмі може служити система віброозбуджувача, схема якого зображена на рис. 8. Цей ВГВ містить двокаскадний елемент керування клапанного типу, що вмонтований у плунжер 2 і є генератором коливань, виконаний разом з виконавчим механізмом, причому зворотний зв'язок елемента керування й виконавчого механізму здійснюється за тиском. Цей віброозбуджувач може бути



рекомендований для забезпечення високочастотних режимів навантаження. Негативним моментом при проектуванні й розрахунку віброзбуджувачів даного типу може виявитися складність аналізу самого процесу роботи.

Спроба позбутися розподільного пристрою у вигляді золотника привела до створення оригінальної конструкції віброзбуджувача з механічним зворотним зв'язком за переміщенням (рис. 9), у якому як розподільний пристрій використовується двоступінчастий клапан 5 з керувальним штоком 2 із двома штирями, верхній з яких 3 жорстко з'єднаний з гідроциліндром (робочим столом) 1, а нижній 4 із двоступінчастим клапаном 6. Штирі 3 і 4 взаємодіють із керувальним штоком 2. Регулювання амплітуди вібрації здійснюється за допомогою зміни зазорів  $A_1$  і  $D_2$  шляхом повороту ексцентричних штирів 3 і 4. До недоліків цієї конструкції варто віднести конструктивну й технологічну складність виготовлення керувального елемента, а також відсутність рекомендацій з розрахунку її параметрів.

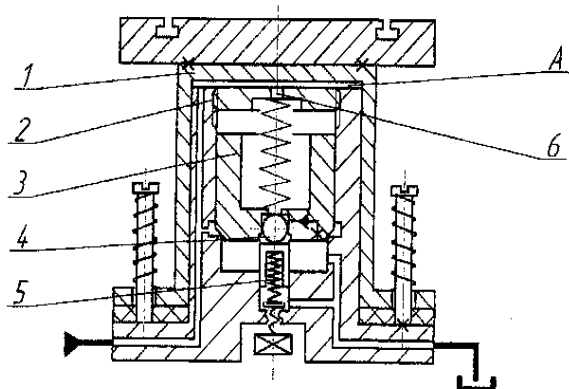


Рис. 8. Схема віброзбуджувача клапанного типу з зворотним зв'язком по тиску: 1 - гідроциліндр; 2 - плунжер; 3 - клапан; 4 - кулька; 5 - поршень; 6 - отвір дросельний; A - порожнина напірна

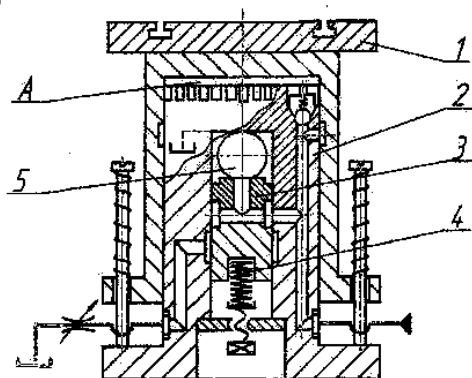


Рис. 9. Схема малогабаритного гідравлічного віброзбуджувача з зворотним зв'язком по тиску золотникового типу (ударний): 1 - стіл робочий; 2 - плунжер; 3 - золотник; 4 - пружина; 5 - кулька

**Математична модель процесу ударно-вібраційного зондування ґрунтів.** На основі аналізу існуючих моделей ґрунтів з урахуванням особливостей досліджуваного процесу пропонується наступна найпростіша модель ударно-вібраційного зондування ґрунтів. По верхньому кінцю зондувального снаряду (рис. 3.1, а), який складається з конуса і бурильних труб, періодично наносяться удари масою  $m$ . Частота ударів така, що перед кожним наступним ударом зондувальний снаряд знаходиться в стані спокою.

Вводяться наступні допущення:

1. Тіло масою  $m$  являється абсолютно твердим тілом.
2. Бурильна колона представляє собою ідеальну пружину з коефіцієнтом жорсткості  $C_1$ , маса якої розподілена між масами  $m$  і  $m_1$ .
3. Ґрунт моделюється пружнопластичним середовищем без в'язких опорів (тобто ідеальною пружиною з коефіцієнтом жорсткості  $C_2$  і постійно пластичною силою опору ґрунту  $F$ ).
4. Удар являється абсолютно непружним, тобто коефіцієнт відновлення  $R=0$ .
5. Хвильові явища, які проходять в бурильному стержні, не враховуються.

Максимальна деформація  $h$  ґрунту складається з пружної і пластичної складових, при цьому обидві являються остаточними, тобто представляють пружні деформації, а точніше деформації, спричинені силою, яка пропорційна переміщенню. Таким чином, описана модель процесу, маючи деякі схожі елементи, відрізняються від вже відомих моделей. Зокрема, по прийнятій тут схематизації ґрунту, деформації, пропорційні переміщенню, супроводжуються пластичним.

Введена пружність зондувального стержня, однак для спрощення з розгляду виключено випадок абсолютно пружного і не зовсім пружного удару. Маса ґрунту, яка приймає частину кінетичної енергії удару, також не враховується. Легко помітити, що представлену модель з повністю можна занести і до динамічного зондування ґрунтів.

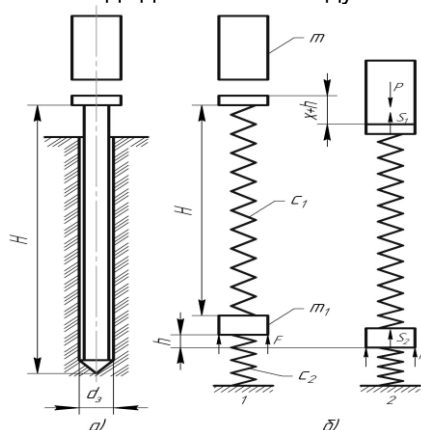
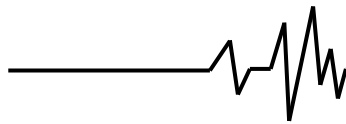


Рис. 10. Найпростіша модель процесу ударно-вібраційного зондування ґрунтів: а - схема снаряду; б - пружно-пластична модель: 1 - до удару; 2 - після удару



В відповідності з прийнятими допущеннями на масу  $m_1$  в процесі її переміщення діють тільки постійні сили і сили, пропорційні переміщенню, тому для знаходження величини занурення зонду за удар можна скористуватися теоремою про зміну кінетичної енергії системи. В відповідності з цією теоремою записуємо наступну рівність:

$$(mv^2/2) - (mv_0^2/2) = \sum A_k, \quad (1)$$

початкова та кінцева швидкість руху ударної маси ( $u=0$ );  $\sum A_k$  – сума роботи усіх зовнішніх і внутрішніх діючих на систему сил.

Сума роботи усіх сил описується рівняннями:

$$\sum A_k = A_1 + A_2 + A_3 + A_4; \quad (2)$$

$$A_1 = P(x+h); \quad (3)$$

$$A_2 = -C_1 \cdot x^2/2; \quad (4)$$

$$A_3 = -C_2 \cdot h^2/2; \quad (5)$$

$$A_4 = -Fh, \quad (6)$$

де  $A_1$  – робота ваги  $P$  ударної маси і бурильного снаряду на переміщення  $x+h$ ;  $x$  – деформація пружини  $C_1$  (зондувального стержня);  $A_2$  – робота пружної сили пружини  $C_1$ ;

$$mv_0^2 + 2P \frac{C_2}{C_1} h + 2Ph = (C_2 h + F) \left( \frac{C_2}{C_1} h + \frac{F}{C_1} \right) + C_2 h^2 + 2Fh, \quad (11)$$

а після перетворення:

$$C_2 (C_1 + C_2) h^2 - 2h(C_1 + C_2)(P - F) - [mv_0^2 C_1 - F(F - 2P)] = 0. \quad (12)$$

Розраховуючи рівняння (12) відносно  $h$ , отримаємо:

$$h = \frac{P - F}{C_2} + \sqrt{\frac{(P - F)^2}{C_2^2} + \frac{C_1 mv_0^2 + F(2P - F)}{C_2(C_1 + C_2)}}. \quad (13)$$

В формулі (13) величина  $C_1$  представляє собою коефіцієнт жорсткості бурильного стержня. В процесі зондування ґрунтів довжина зондувального стержня змінюється і внаслідок цього змінюється його коефіцієнт жорсткості.

Представимо величину  $C_1$  виразом:

$$C_1 = C'_1 / H, \quad (14)$$

де  $C'_1$  – коефіцієнт жорсткості одиниці довжини фондованого стержня;  $H$  – довжина зондувального стержня.

Тоді вираз (13) можна записати в вигляді:

$A_3$  – робота пружної сили пружини  $C_2$ ;  $A_4$  – робота постійних опорів  $F$ .

Підставляючи вирази (3) – (6) в формулу (2) і враховуючи, що  $u=0$ , отримаємо:

$$\frac{-mv_0^2}{2} = P(x+h) - \frac{C_1 x^2}{2} - \frac{C_2 h^2}{2} - Fh, \quad (7)$$

а після перетворення:

$$\frac{mv_0^2}{2} + P(x+h) = \frac{C_1 x^2}{2} + \frac{C_2 h^2}{2} + Fh. \quad (8)$$

В лівій частині рівності (8) – кінетична енергія ударної маси і робота ваги, в правій – робота пружної деформації зондувального стержня, деформації ґрунту, визваною силою, пропорційної переміщенню, і робота пластичних опорів.

З умови рівності маси  $m_1$  під дією постійної сили, прикладеної до верхнього кінця пружини  $C_1$ , справедлива рівність:

$$C_1 x = C_2 h + F. \quad (9)$$

Нехтуючи масою  $m_1$  яка являється незначною, отримаємо:

$$x = \frac{C_2}{C_1} h + \frac{F}{C_1}. \quad (10)$$

Підставляючи формулу (10) в формулу (8), отримаємо:

$$h = \frac{P - F}{C_2} + \sqrt{\frac{(P - F)^2}{C_2^2} + \frac{C'_1 mv_0^2 + HF(2P - F)}{C_2(C'_1 + HC_2)}}. \quad (15)$$

Формула (15) дозволяє розраховувати величину занурюваного зонду за удар в залежності від вхідних в неї параметрів. Очевидно, що відома частота ударів  $n$  в одиницю часу, легко можна визначити швидкість занурення віброзонду по формулі:

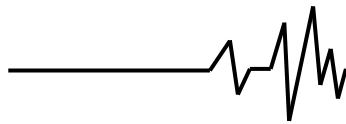
$$v_g = nh. \quad (16)$$

Окремими випадками ударним забиванням зонду, які описуються виразом (15), являються наступні:

1. Пластичні опори ґрунту малі, тобто  $F=0$ :

$$h = -\frac{P}{C_2} + \sqrt{\frac{P^2}{C_2^2} + \frac{C'_1 mv_0^2}{C_2(C'_1 + HC_2)}}. \quad (17)$$





2. Вага ударної маси і зондувального стержня в порівнянні з пластичними і пружними опорами ґрунту мала, тобто  $P=0$ :

$$h = -\frac{F}{C_2} + \sqrt{\frac{F^2}{C_2^2} + \frac{C_1' m v_0^2 - H F^2}{C_2 (C_1' + H C_2)}}. \quad (18)$$

3. Пластичні опори ґрунту незначні, вага ударної маси і зондувального стержня також малі, тобто  $F=0$  і  $P=0$ :

$$h = v_0 \sqrt{\frac{C_1' m}{C_2 (C_1' + H C_2)}}. \quad (19)$$

4. Пружними властивостями ґрунт практично не володіє, тобто  $C_2=0$ . Для визначення  $h$  в цьому випадку необхідно скористуватися виразом (17), тоді:

$$h = \frac{-m v_0^2 C_1' - H F (2P - F)}{2 C_1' (P - F)}. \quad (20)$$

Вираз (20) справедливий при  $F > P$ .

Розглядувана модель дозволяє також отримати критерій нормального занурення і максимальної довжини  $H$  зондувального стержня, при якому процес занурення (для заданих параметрів) призупиняється.

З виразу (12) легко встановити, що процес занурення не буде відбуватися:

- При  $P \neq 0$ 

$$-m v_0^2 \leq \left[ (F^2 - 2PF) / C_1 \right]; \quad (21)$$

- При  $P = 0$ 

$$m v_0^2 \leq F^2 / C_1. \quad (22)$$

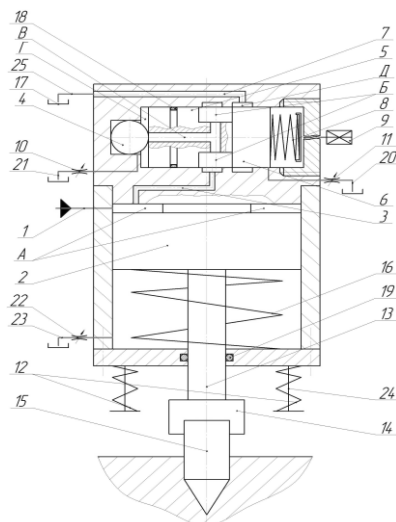


Рис. 11. Принципова схема гідромолота з вбудованим вібробудувачем

Пружини 12, встановлені на шпильки 24, та призначені для повернення поршня 2 у вихідне положення. У сидлі виточки корпусу гідромолота встановлена кулька 4, яка

Значення  $H_{\max}$ , при якому процес занурення призупиниться, можна визначити за формулами:

- При  $P \neq 0$ 

$$H_{\max} = \left[ (m v_0^2 C_1') / (F^2 - 2PF) \right], \quad (23)$$

- При  $P = 0$ 

$$H_{\max} = \left[ (m v_0^2 C_1') / F^2 \right]. \quad (24)$$

Цікаво замітити, що максимальна довжина снаряду, при якій зонд не буде занурюватися в ґрунт, не залежить від опору ґрунту, пропорційного переміщенню, тобто від  $C_2$ .

Величина початкового занурення зонду за удар, що відповідає випадку, коли  $H=0$ , при нехтуванні ваги ударної маси і зонду визначається за формулою:

$$h = -\frac{F}{C_2} + \sqrt{\frac{F^2}{C_2^2} + \frac{m v_0^2}{C_2}}. \quad (25)$$

Отримані формули, при усьй їх простоті дозволяють впритул підійти до питання про інтерпретації даних ударного та УДВ зондування ґрунтів.

**Розробка гідроімпульсного приводу установки для зондування ґрунтів.** Явні переваги гідроімпульсного приводу над механічним дає змогу підвищити продуктивність роботи установки в цілому, а також дозволяє мобільно використовувати обладнання без прив'язки до конкретного агрегату. Розроблена схема гідромолоту з вбудованим вібробудувачем представлена на рис. 11.

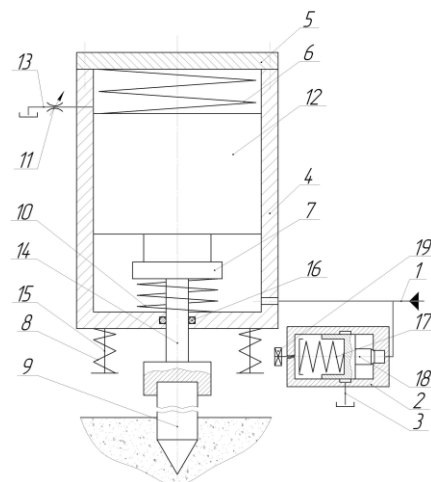
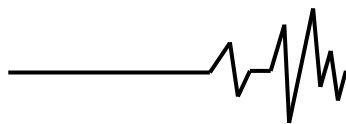


Рис. 12. Принципова схема гідромолота з однокаскадним вібробудувачем

підтискається золотником 5, створюючи невелику площу контакту між його каналом В і порожниною Г. Поршень 6 підтискається до золотника 5 пружиною 8, яка може



регулюватися за допомогою регулювального гвинта 9. Канал 7 з'єднує порожнину Д зливною гідролінією 25, через яку робочої рідини потрапляє в бак 1. Дросель 10 з'єднаний з гідролінією 23 і застосовується для полегшеного запуску вібромолота. Дроселі 11 і 22, а також гідролінії 21 та 23, призначені для зливу робочої рідини яка може скупчуватися в порожнині встановлення пружин 9 та 16 відповідно.

Розроблений гідромолот з однокаскадним вібробуджувачем (рис. 12) складається з напірної магістралі 1, однокаскадний клапана-пульсатора та робочої порожнини циліндра гідромолота. Клапан-пульсатор підключений до напірної 2 та зливної 3 магістралі. У корпусі 2 клапана-пульсатора розміщений золотник 18, підтиснений пружиною 17, зусилля підтиснення якої регулюється гвинтом 19. Поршень 12 встановлений у корпусі 4, та підтиснений за допомогою пружини 6.

Розроблений гідромолот з двокаскадним вібробуджувачем (рис. 13) складається з напірної магістралі 1 до якої підключений двокаскадний клапан-пульсатор, який в свою чергу підключений до напірної 2 та зливної 3 магістралей, при чому через напірну магістраль 2 він з'єднаний з робочою порожниною циліндра гідромолота. У корпусі двокаскадного клапана-пульсатора розміщений клапан 22 підтиснений пружиною 26, а втулка 25 підтиснена пружиною 19. Клапан зі штовхачем 20 підтиснений пружиною 23. Зусилля стиску пружини 23 регулюється гвинтом 21. Поршень 12 встановлений у корпусі 4 циліндра гідромолота, та підтримується у початковому положенні за допомогою пружини 10.

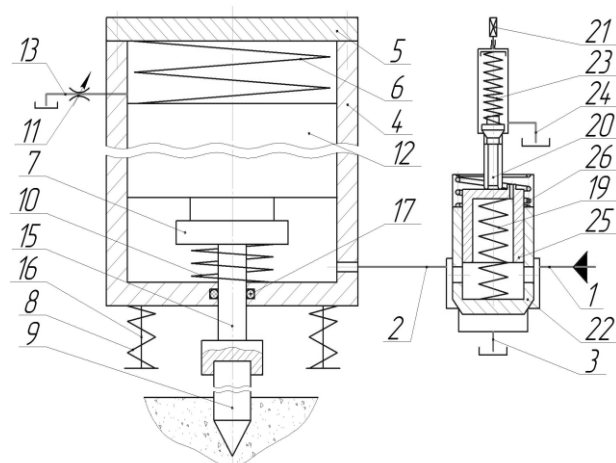


Рис. 13. Принципова схема гідромолота з двокаскадним вібробуджувачем

Корпус 4 герметично закритий кришкою 5. Ударник 7 жорстко з'єднаний з штоком 15, та віброзондом 9. Пружини 8, встановлені на шпильки 16, та призначені для повернення

поршня 12 у вихідне положення. Пружина 10 підтримує ударник 7 у вихідному положенні та виконує роль демпфера. Дросель 11 і магістраль 13 призначені для зливу робочої рідини яка може скупчуватися в порожнині встановлення пружини 6. Для зменшення витоків через зазор між штоком 14 та корпусом 4 у вібромолоті використано ущільнююче кільце 16. Кришка 5 пригвинчена до корпусу 4 та сприяє полегшеному складанню гідромолота.

Розроблений гідромолот з гідроакумулятором та вбудованим вібробуджувачем (рис. 14) складається з напірної магістралі 1 до якої підключений двокаскадний клапан-пульсатор, який в свою чергу підключений до напірної 2 та зливної 3 магістралей, при чому через напірну магістраль 2 він з'єднаний з робочою порожниною циліндра гідромолота. У корпусі двокаскадного клапана-пульсатора розміщений клапан 22 підтиснений пружиною 26, а втулка 25 підтиснена пружиною 19. Клапан зі штовхачем 20 підтиснений пружиною 23. Зусилля стиску пружини 23 регулюється гвинтом 21. Поршень 12 встановлений у корпусі 4 циліндра гідромолота, та підтримується у початковому положенні за допомогою пружини 10. Корпус 4 герметично закритий кришкою 5. Ударник 7 жорстко з'єднаний з штоком 15, та віброзондом 9. Пружини 8, встановлені на шпильки 16, та призначені для повернення поршня 12 у вихідне положення. Пружина 10 підтримує ударник 7 у вихідному положенні та виконує роль демпфера. Дросель 11 і магістраль 13 призначені для зливу робочої рідини яка може скупчуватися в порожнині встановлення пружини 6. Для зменшення витоків через зазор між штоком 14 та корпусом 4 у вібромолоті використано ущільнююче кільце 16. Кришка 5 пригвинчена до корпусу 4 та сприяє полегшеному складанню гідромолота.

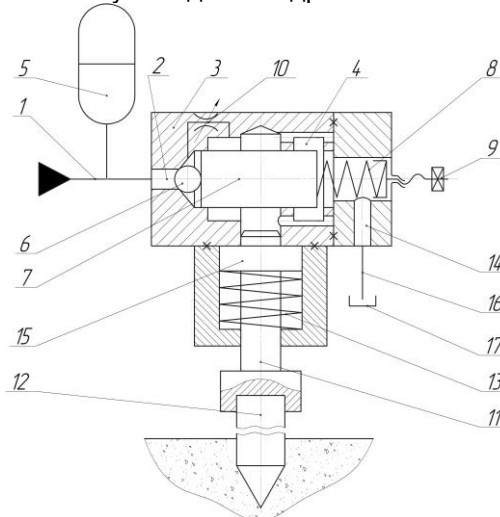
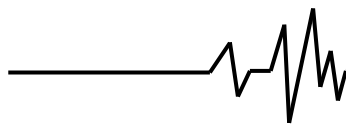


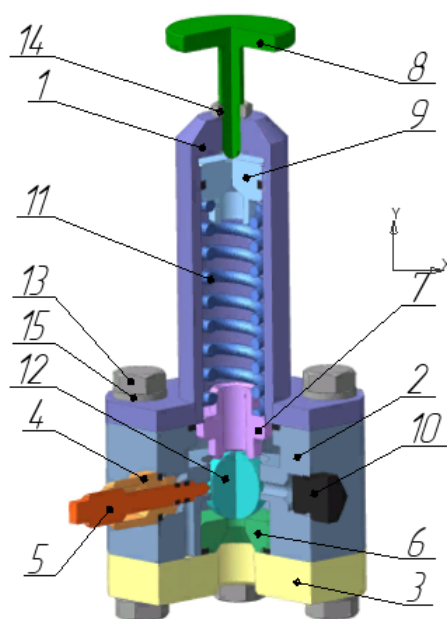
Рис. 14. Принципова схема гідромолота



Принцип роботи гідромолота полягає в тому, що гідравлічна рідина через напірну магістраль 1 потрапляє в напірний канал гідромолота, та спричиняє збільшення тиску в ньому. Паралельно з цим робоча рідина потрапляє в гідроаккумулятор 5, де відбувається додаткове накопичення енергії робочої рідини. Підвищення тиску в напірному каналі сприяє переміщенню поршня кульки 6 і золотника 7. Коли тиск в напірному каналі перевищує налаштований тиск відкриття, напірний каналу 2 та робоча порожнина 4 гідромолота з'єднуються, що призводить до миттєвого збільшення тиску в робочій порожнині 4 гідромолота, та відкидання поршня 15. Такий

режим роботи характерний для палезанурюючих молотів і трамбовок, які діють на ґрунт в кінці ходу рухомих частин в момент зіткнення мас. Конструктивна особливість цього клапана-пульсатора полягає в збільшенні підхоплення площі штовхача за рахунок розміщення в осьовому розточуванні основного клапана 4 двох співвісних штовхачів 5 і 7, жорстко пов'язаних між собою циліндричною проставкою 6 з Т-образним каналом. Однак така конструкція не дозволяє при витратах до  $(10 - 15) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{хв}$  отримати частоту пульсацій клапана більш 10 - 15 Гц.

### Клапан-пульсатор 3D модель



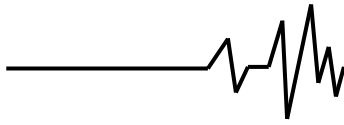
- 1 – стакан;
- 2 – корпус;
- 3 – кришка;
- 4 – втулка;
- 5 – голка;
- 6 – сідло;
- 7 – опора нижня;
- 8 – гвинт регулятора;
- 9 – опора верхня;
- 10 – пробка;
- 11 – пружина;
- 12 – кулька;
- 13 – долт;
- 14 – гайка;
- 15 – шайба.

Рис. 15 – Використання числових методів на основі програми FlowVision 3D модель клапана-пульсатора

Досить просте рішення знайдено для управління гідроімпульсним приводом, що не вимагає широкого діапазону регулювання і що має деякий тиск підпору в зливній лінії. При цьому використовують інерційний однокаскадний клапан-пульсатор. Налаштувальною площею відкриття є торець плунжера 10, а підхоплюючою площею - різниця між торцевими площами золотника 11 і плунжера 10 при певному тиску підпору в зливній лінії 13. Особливість конструкції полягає в використанні сили інерції змінною маси 12, укріпленої на хвостовику золотника 11. Сила виникає в момент відкриття основного розподільного елемента.

**Висновки.** В результаті аналізу відомих способів та приводів установок для зондування ґрунтів можна зробити висновки, що існує дуже велика їх кількість. Тому доцільним є розробка

установок для зондування ґрунтів з гідроімпульсним приводом, які дадуть змогу підвищити ефективність виконуваних робіт та зможуть розширити функціональні можливості за рахунок налагодження. Проведено обґрунтування проведення зондування на різних типах ґрунтів, виходячи їх фізико-механічних параметрів, що дозволило окреслити спектр використання установки з гідроімпульсним приводом для зондування ґрунтів. Розроблено математичну модель процесу зондування ґрунтів при використанні вібраційних установок а також найпростішу розрахункову модель. Розроблено ряд конструктивних схем гідромолотів з гідроімпульсним приводом для зондування ґрунтів, які дозволять підвищити ефективність та швидкодію процесу зондування, а також будуть мати можливість налагодження, що



розширить діапазон виконуваних робіт на цих установках, і створить нові альтернативні області застосування.

#### Список використаних джерел

1. Rostislav D. Iskovych-Lototsky, Yaroslav V. Ivanchuk, Natalia R. Veselovska, Wojciech Surtel, Samat Sundetov. "Automatic system for modeling vibro-impact unloading bulk cargo on vehicles", Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 1080860 (1 October 2018). DOI: 10.1117/12.2501526.

2. Іскович – Лотоцький Р.Д. Процеси та машини вібраційних і віброударних технологій. Монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ. Вінниця, 2006. 291 с.

3. Іскович – Лотоцький Р.Д., Обертюк Р.Р., Архипчук М.Р. Генератори імпульсів тиску для керування гідроімпульсними приводами вібраційних та віброударних технологічних машин: Монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця. 2008. 171 с.

4. Іскович-Лотоцький Р.Д., Івашко Є.І. Гідромолот з будованим вібробудзхувачем. Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали тез доповідей ХХІ міжнародної науково-технічної конференції (24-27 травня 2016 р., м. Київ). Київ: КПІ, 2016.

5. Іскович-Лотоцький Р.Д. Експериментальний стенд для дослідження гідроімпульсного провода вібромолота для зондування ґрунтів. Гідро- та мпемвоприводи машин – сучасні досягнення та застосування: матеріали тез доповідей міжнародної науково-технічної конференції (15-30 листопада 2016 р., м. Вінниця). Вінниця: ВНТУ, 2016.

#### References

1. Rostislav D. Iskovych-Lototsky, Yaroslav V. Ivanchuk, Natalia R. Veselovska, Wojciech Surtel, Samat Sundetov. "Automatic system for modeling vibro-impact unloading bulk cargo on vehicles", Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 1080860 (1 October 2018). DOI: 10.1117/12.2501526.

2. Iskovych – Lotots'kyi R.D. Protsesi ta mashyny vibratsiynykh i vibroudarnykh tekhnolohiy. Monohrafiya. Vinnytsya: UNIVERSUM. Vinnytsya, 2006. 291 s.

3. Iskovych – Lotots'kyi R.D., Obertyukh R.R., Arkhynchuk M.R. Heneratory impul'siv tysku dlya keruvannya hidroimpul'snymy pryvodamy vibratsiynykh ta vibroudarnykh tekhnolohichnykh

mashyn: Monohrafiya. Vinnytsya: UNIVERSUM – Vinnytsya. 2008. 171 s.

4. Iskovych-Lotots'kyi R.D., Ivashko YE.I. Hidromolot z budovanyim vibrozbudzhuvachem. Hidroaeromekhanika v inzhenerniy praktytsi: materialy tez dopovidey KHKHI mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi (24-27 travnya 2016 r., m. Kyiv). Kyiv: KPI, 2016.

5. Iskovych-Lotots'kyi R.D. Eksperymental'nyy stend dlya doslidzhennya hidroimpul'snoho provoda vibromolota dlya zonduvannya gruntiv. Hidro- ta mpevmopryvody mashyn – suchasni dosyahnennya ta zastosuvannya: materialy tez dopovidey mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi (15-30 lystopada 2016 r., m. Vinnytsya). Vinnytsya: VNTU, 2016. [in Ukrainian].

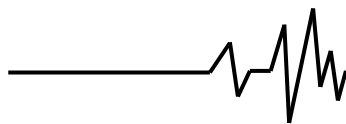
#### IMPROVING THE EFFICIENCY OF SOIL SOUNDING AT HYDROPULSE DRIVE INSTALLATIONS

The study of soils by immersion of the cone under the influence of UVZ is one of the express methods of obtaining engineering and geological information about the physical and mechanical properties of the foundation from loose soils of buildings and structures. It allows to detect the degree of homogeneity of probed soils; determine the position of the boundaries (contacts) of different lithological layers and bearing layers for the fuel base; identify and delineate in plan and depth weakened areas in the study areas to accurately link the location of research work; choose the best choice of hammers; evaluate the physical and mechanical properties of sandy soils (density, angle of internal friction, etc.); to estimate the modulus of deformation of sandy soils.

The aim of the work is to increase efficiency, speed and the ability to regulate the process of sounding soils by developing and using installations with a hydropulse drive.

The main tasks are the development, research and calculation of the basic parameters of installations with hydropulse drive for soil sounding.

The object of research is the process of sounding the soil. The subject of research is the hydropulse drive of the installation for soil sounding. Experience has shown that the effective application of field methods is possible only with a methodically correct approach to the preparation and implementation of programs of the whole complex of exploration work. Various aspects of the problem of integrated soil research by field methods were developed and deepened gradually. The main research methods include the analysis of information on existing methods and installations for spraying tungsten powders,



mathematical modeling of processes in the spindle assembly of the installation for spraying metal powders, taking into account its design features and modes of operation based on nonlinear differential equations of heat transfer from solid and liquid

bodies using numerical methods for solving them based on the program FlowVision.

**Keywords:** complex, functionality, equipment, machining process, machines.

#### ***Відомості про авторів***

**Іскович-Лотоцький Ростислав Дмитрович** – доктор технічних наук, професор кафедри «Галузевого машинобудування» Вінницького національного технічного університету (вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21021, e-mail: [islord@ukr.net](mailto:islord@ukr.net)).

**Веселовська Наталія Ростиславівна** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: [wnatalia@ukr.net](mailto:wnatalia@ukr.net)).

**Брацлавець Богдан Сергійович** – аспірант кафедри «Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна).

**Шевченко Василь Васильович** – магістр кафедри «Галузевого машинобудування» Вінницького національного технічного університету (вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21021)

**Iskovich-Lototsky Rostyslav Dmytrovych** - Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of "Branch Mechanical Engineering" of Vinnitsa National Technical University (95, Khmelnytsky Shose Str., Vinnytsia, Ukraine, 21021, e-mail: [islord@ukr.net](mailto:islord@ukr.net)).

**Veselovska Nataliia Rostyslavivna** - Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Machines and Equipment of Agricultural Production of Vinnitsa National Agrarian University (3 Soniachna St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: [wnatalia@ukr.net](mailto:wnatalia@ukr.net)).

**Bratslavets Bohdan** – post-graduate student of the Department "Machinery and Equipment of Agricultural Production" of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna Street, Vinnytsia, 21008, Ukraine).

**Shevchenko Vasyl** - Master of the Department of Industrial Engineering, Vinnytsia National Technical University (95 Khmelnytske Shosse St., Vinnytsia, Ukraine, 21021)