

Кірієнко О. А.

Національний технічний  
університет України  
"Київський  
політехнічний  
інститут"

Kirienko O. A.

The National Technical  
University of Ukraine  
"Kyiv Polytechnic  
Institute"

УДК 624.132.334

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВІБРАЦІЙНИХ СПОСОБІВ ПРОКОЛУ ҐРУНТІВ ПРИ БЕЗТРАНШЕЙНОМУ ПРОКЛАДАННІ ТРУБОПРОВОДІВ

У статті розглянуті питання визначення областей раціонального застосування способів вібропроколу та віброударно-вдавлювального проколу при безтраншейному прокладанні трубопроводів у чвертьхвильовому резонансному режимі з метою підвищення їх продуктивності за рахунок збільшення швидкості заглиблення, проникаючої здатності, можливості долати великі лобові опори ґрунту при прийнятній енергоємності процесу. Дослідження виконані на основі хвильової теорії розповсюдження напружень у трубі, що заглиблюється, та ґрунті. Проведений порівняльний аналіз цих способів проколу за швидкістю, споживаною потужністю та енергоємністю процесу. Отримані залежності середньої швидкості заглиблення труби та споживаної потужності від величини лобового опору ґрунту та від глибини проходки для процесів вібропроколу та віброударно-вдавлювального проколу. Показані особливості способів проколу в чвертьхвильовому резонансному режимі при роботі в ґрунтах різного степеню щільності. Надаються рекомендації щодо технічних характеристик установок для проколу, що працюють у чвертьхвильовому резонансному режимі.

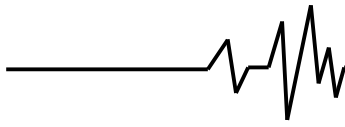
**Ключові слова:** вібропрокол, віброударно-вдавлювальний прокол, чвертьхвильовий резонансний режим, безтраншейна прокладка трубопроводів.

**Вступ.** Одним із шляхів інтенсифікації та розширення можливостей вібраційних способів проколу ґрунтів при безтраншейному прокладанні трубопроводів (вібропрокол, віброударний і віброударно-вдавлювальний прокол) є застосування високочастотних резонансних режимів.

У роботі [1] наведені результати дослідження на основі хвильової теорії процесу вібропроколу довгомірними трубами (40 м) при змінній частоті збурювального діяння в діапазоні, що включає частоти власних поздовжніх коливань труби, що заглиблюється, та продемонстровані переваги роботи у чвертьхвильовому резонансному режимі, за якого досягається висока швидкість проходки порівняно з низькочастотними режимами, стабільність швидкості на всій глибині проходки, є можливість долати значні лобові опори ґрунту.

Аналогічні дослідження наведені в [2] для процесів віброударного та віброударно-вдавлювального проколів. Відмінність в характері прикладання збурювального діяння (вібраційне, віброударне) обумовлює і деякі відмінності в процесах проколу вібраційними способами при роботі у високочастотних режимах, однак переваги чвертьхвильового резонансного режиму порівняно з низькочастотними зберігаються для всіх способів проколу [1, 2].

**Мета даної статті** – визначити області раціонального застосування способів вібропроколу та віброударно-вдавлювального проколу в чвертьхвильовому резонансному режимі та дати рекомендації на розробку установок для проколу, що працюють в цьому режимі, на підставі порівняльного аналізу цих способів за швидкістю заглиблення, споживаною потужністю та прийнятною енергоємністю процесу.



**Основна частина.** Як відомо [3], для процесу проколу найважливішою є здатність установки долати різкі місцеві підвищення міцності ґрунту (тверді включення).

У роботі [2] показано, що процес віброударного проколу при роботі у високочастотних резонансних режимах, зокрема, у чвертьхвильовому, має гірші показники (швидкість заглиблення та енергоємність) порівняно з процесом віброударно-вдавлювального проколу внаслідок високих затрат потужності, яка не може бути реалізована в існуючих установках для віброударного проколу.

Таким чином, найцікавішим є порівняння тільки способів вібропроколу та віброударно-вдавлювального проколів при змінній ґрунтових умов (зростанні лобового опору ґрунту, а також бокового опору з глибиною, на всій довжині проходки).

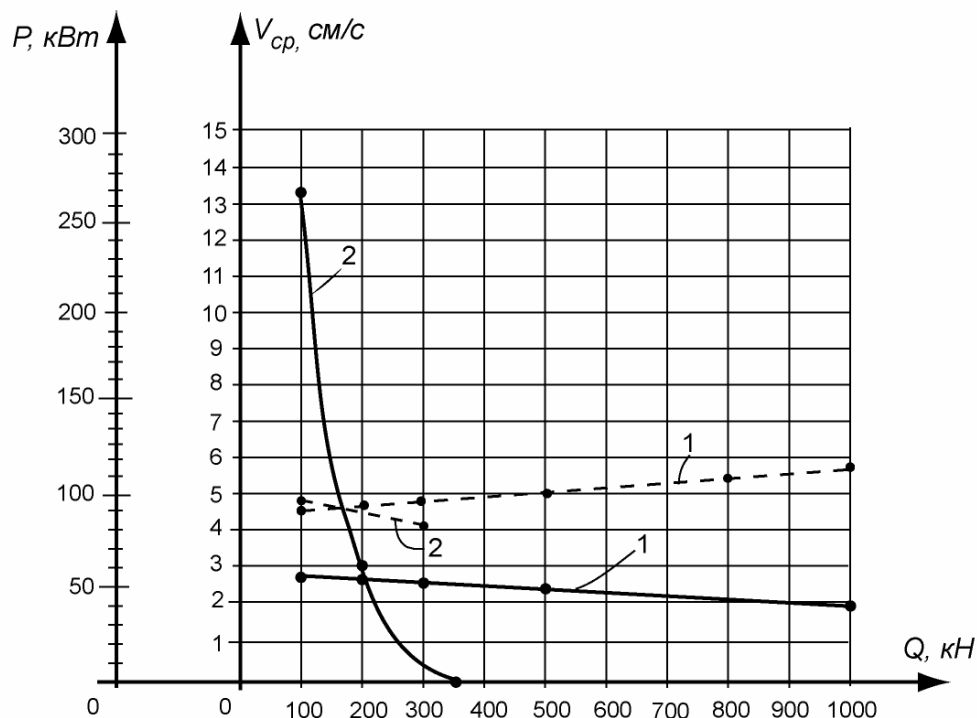
Розглянемо процес заглиблення труби довжиною 40 м і діаметром 325 мм у чвертьхвильовому режимі (частота вібрації із урахуванням невіднесеної маси вібратора

або жорстко приєднаних до труби частин установки – 23 Гц [1]) при збільшенні лобового опору ґрунту при вібропроколі та віброударно-вдавлювальному проколі.

Методика дослідження процесів проколу така ж, як і в [1, 2]. При варіаціях параметрів труби в діапазоні, що застосовуються в практиці вібропроколу, основні висновки цих робіт залишаються справедливими.

Для дослідження були прийняті наступні параметри процесу: амплітуда збурювальної сили вібратора для вібропроколу 680 кН, для віброударно-вдавлювального проколу 300 кН (зниження амплітуди збурювальної сили вібромотола обумовлено необхідністю зменшення споживаної потужності до меж, що реалізуються в існуючих установках [2]), глибина попереднього заглиблення в ґрунт 20 м, сила сухого тертя по боковій поверхні труби 6 кН/м.

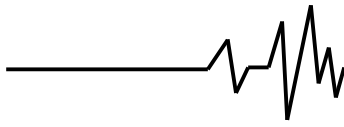
Графіки залежності середньої швидкості заглиблення труби та потужності, що споживається, від лобового опору ґрунту для обох способів проколу наведені на рис. 1.



**Рис. 1.** Графіки залежності від лобового опору ґрунту швидкості заглиблення труби (—) і потужності, що споживається (---), в чвертьхвильовому режимі: 1 – вібропрокол; 2 – віброударно-вдавлювальний прокол

При лобовому опорі ґрунту в зоні пластичних деформацій 200 кН (зона пружності ґрунту по лобовій поверхні труби прийнята 0,4 см для випадків, що розглядаються), швидкість заглиблення в процесі віброударно-вдавлювального проколу складає 3 см/с при

витратах потужності близько 90 кВт (енергоємність процесу складає 30 кВт·с/см). При вібропроколі швидкість заглиблення в цьому випадку дорівнює 2,7 см/с при такій же потужності, тобто при однаковій встановленій потужності (за рахунок зниження амплітуди



збурювальної сили вібромота при віброударно-вдавлювальному проколі) в ґрунтах середньої щільності швидкості проходки для обох способів проколу приблизно рівні.

Однак в процесі віброударно-вдавлювального проколу із збільшенням лобового опору ґрунту швидкість заглиблення труби різко знижується і при лобовому опорі ґрунту 300 кН дорівнює 0,4 см/с при потужності 85 кВт, енергоємність процесу зростає до 212,5 кВт·с/см. У той же час в процесі вібропроколу (крива 1) швидкість заглиблення становить 2,5 см/с при потужності близько 100 кВт (енергоємність процесу складає 40 кВт·с/см<sup>2</sup>, тобто збільшується несуттєво).

Таким чином, показники процесу вібропроколу стають значно краще, ніж процесу віброударно-вдавлювального проколу. При подальшому збільшенні лобового опору ґрунту переваги способу вібропроколу цілком очевидні.

При лобовому опорі ґрунту більш ніж 300 кН заглиблення труби в процесі віброударно-вдавлювального проколу повністю припиняється, в той час як в процесі вібропроколу труба успішно заглиблюється із збільшенням лобового опору до 1000 кН.

З точки зору можливості подолання зростаючого лобового опору ґрунту спосіб вібропроколу при роботі в чвертьхвильовому резонансному режимі більш ефективний, ніж спосіб віброударно-вдавлювального проколу, тому що дає можливість заглиблювати труби при великих лобових опорах ґрунту, а головне, долати різкі місцеві підвищення щільності ґрунту (тверді включення).

При проведенні процесу проколу в слабких ґрунтах і ґрунтах середньої щільності (лобовий опір до 200 кН) при однаковій споживаній потужності кращі показники проходки (високу швидкість та відносно невелику енергоємність) забезпечує спосіб віброударно-вдавлювального проколу, однак при зустрічі з твердими включеннями в ґрунті (різкому «стопорінні» труби) саме спосіб вібропроколу забезпечує «ефект чвертьхвильової лінії» [1], тобто утворення в трубі поздовжньої стоячої хвилі з пучністю зусилля на її забойному кінці, що і дозволяє долати (відтіснити або дробити) ґрунтову перешкоду.

Порівняємо способи вібропроколу та віброударно-вдавлювального проколу при змінненні бокового опору ґрунту, що зростає з глибиною, що для процесу вібропроколу є негативним фактором, а для процесу віброударного та віброударно-вдавлювального

проколів до певної величини є необхідною умовою, що інтенсифікує процес проходки («ефект саморуху») [3].

При дослідженні впливу на швидкість заглиблення та споживану потужність бокового опору ґрунту для обох способів проколу приймалось, що боковий опір лінійно (в першому наближенні) зростає з глибиною (за наявності конусного наконечника діаметром, рівним діаметру труби).

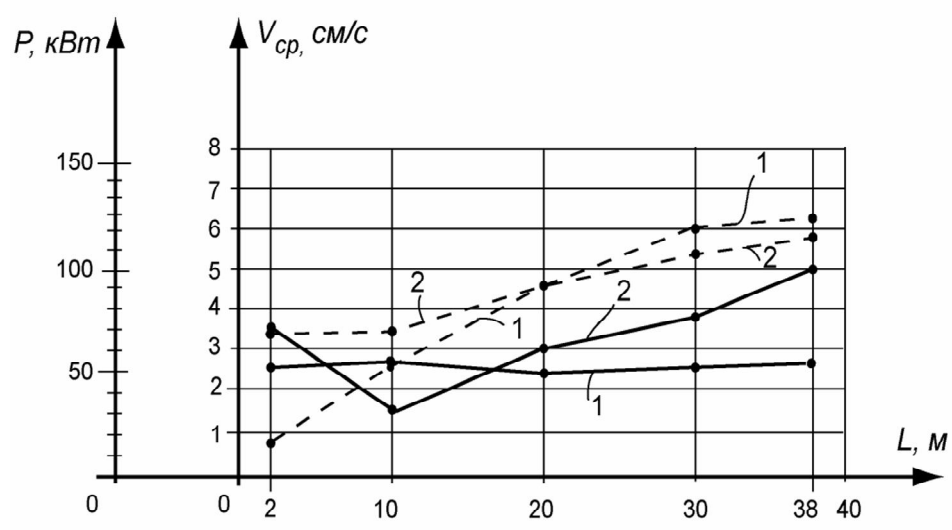
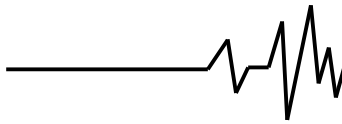
На рис. 2 наведені графіки середньої швидкості та споживаної потужності в чвертьхвильовому режимі (частота вібрації 23 Гц) для вібропроколу (крива 1) та віброударно-вдавлювального проколу (крива 2).

У процесі вібропроколу на всій глибині проходки від 2 до 38 м, із урахуванням лобового опору ґрунту, швидкість заглиблення залишається практично незмінною та дорівнює приблизно 2,7 см/с. Споживана потужність, а відповідно, і енергоємність процесу, збільшується з глибиною заглиблення, стабілізуючись лише на останніх десяти метрах проходки, та складає наприкінці заглиблення приблизно 120 кВт (енергоємність процесу складає близько 45 кВт·с/см, тобто практично прийнятна).

У процесі віброударно-вдавлювального проколу швидкість заглиблення коливається на різних глибинах від 1,5 до 5 см/с при максимальній потужності наприкінці проходки також близько 120 кВт (енергоємність процесу дорівнює 24 кВт·с/см<sup>2</sup>). Таким чином, при приблизно однакових затратах потужності середня швидкість проходки в процесі віброударно-вдавлювального проколу у декілька разів вище, ніж у процесі вібропроколу.

Однак необхідно мати на увазі, що вищезазначені переваги (більш висока швидкість та невелика енергоємність процесу) спосіб віброударно-вдавлювального проколу має тільки у відносно слабких ґрунтах. У розглянутих випадках лобовий опір ґрунту дорівнює 200 кН, пружна жорсткість ґрунту по лобовій поверхні труби 500 кН/см, тобто, як вже зазначалось, при великих значеннях лобового опору в більш складних ґрунтових умовах спосіб вібропроколу виявляється більш ефективним.

Ураховуючи вищезазначене, можна зробити висновок, що при роботі в чвертьхвильовому режимі обидва способи проколу є ефективними, хоча і мають різні області їх раціонального застосування на практиці.



**Рис. 2. Графіки залежності від глибини швидкості заглиблення труби в ґрунт (—) і потужності, що споживається (----), в чвертьхвильовому режимі: 1 – вібропрокол; 2 – віброударно-вдавлювальний прокол**

При розробці параметрів установок для вібропроколу і віброударно-вдавлювального проколу, що працюють у високочастотних резонансних режимах, діапазон змінення частоти коливань вібратора (вібромолота) повинен розраховуватися з урахуванням чвертьхвильової резонансної частоти власних поздовжніх коливань труби, що заглиблюється, як пружного стрижня.

Установки для проколу повинні мати високочастотний резонансний вібратор і електропривід, що дозволяє регулювати швидкість обертання дебалансів вібратора (частоту вібрації).

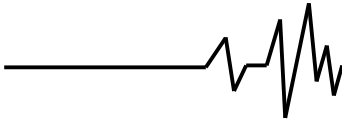
Наведемо у якості прикладу один із можливих варіантів технічних характеристик установок для вібропроколу і віброударно-вдавлювального проколу, що працюють в чвертьхвильовому резонансному режимі, для труб діаметром 325 мм, довжиною 20-40 м (див. таблицю).

При розробці технічних характеристик установок для проколу, що працюють у високочастотних резонансних режимах, необхідно враховувати й інші параметри, зокрема, конструктивні (жорсткість пружин напірного механізму при вібропроколі, жорсткість пружин вібромолота тощо), що впливають на процес проходки [1,2].

**Таблиця**

**Технічні характеристики установок для вібропроколу та віброударно-вдавлювального проколу, що працюють у чвертьхвильовому резонансному режимі**

Технічні характеристики	Од. вим.	Вібропрокол	Віброударно-вдавлювальний прокол
1. Статичний момент дебалансів вібратора	кг·см	2000-4000	1000-2000
2. Частота коливань	кол/хв	1200-3600	1200-3600
3. Амплітуда збурювальної сили вібратора	кН	680	300
4. Маса невіднесеної частини вібратора або жорстко приєднаних до труби частин установки	кг	1600	1600
5. Маса ударної частини вібромолота	кг	-	2600
6. Маса труби, що заглиблюється	кг	5300	5300
7. Потужність електродвигунів вібратора	кВт	120	120



### Висновки

1. При прокладанні труб в ґрунтах малої та середньої щільності спосіб віброударно-вдавлювального проколу при роботі в чвертьхвильовому резонансному режимі забезпечує швидкість заглиблення значно вище, ніж спосіб вібропроколу, при однаковій споживаній потужності.

2. При прокладанні труб у важких ґрунтових умовах, а також при імовірності зустрічі труби з твердими включеннями в ґрунті (наприклад, при проходженні під залізничними насипами) перевага надається способу вібропроколу, тому що він надає можливість успішно долати такі перешкоди.

### Список використаних джерел

1. Кірієнко О.А. Застосування звукорезонансних режимів роботи при безтраншейному прокладанні труб методом вібропроколу. – ВНТЖ «Вібрації в техніці та технологіях». 2011, №2(62). с. 72–77.

2. Кірієнко О.А. Дослідження процесу віброударного проколу при безтраншейному прокладанні трубопроводів на основі хвильового уявлення. – ВНТЖ «Вібрації в техніці та технологіях». 2013, №4(72). с. 61–68.

3. Кершенбаум Н.Я., Минаев В.И. Виброметод в проходке горизонтальных скважин. М., «Недра». 1968. – 152 с.

### Список джерел в транслітерації

1. Kirienko O.A. Zastosuvannya zvukorezonansnikh rezhimiv roboty pry beztransheynomu prokladanni trub metodom vibroprokolu. – VNTZH "Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh". 2011, №2(62). s. 72–77.

2. Kirienko O.A. Issledovaniya protsessu vibroudarnogho prokolu pry beztransheynomu prokladanni truboprovodiv na osnovi hviliaovogho uiavlenniya. - VNTZH "Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh". 2013, №4(72). s. 61–68.

3. Kershenbaum N.YA., Minayev V.I. Vibrometod v prokhodke gorizontalnykh skvazhin.M., «Nedra». 1968. – 152 s.

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВИБРАЦИОННЫХ СПОСОБОВ ПРОКОЛА ГРУНТОВ ПРИ БЕСТРАНШЕЙНОЙ ПРОКЛАДКЕ ТРУБОПРОВОДОВ

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы определения областей рационального применения способов вибропрокола и виброударно-вдавляющего прокола при бестраншейной прокладке трубопроводов в четвертьволновом резонансном режиме с целью повышения их

производительности за счет увеличения скорости проходки, проникающей способности, возможности преодолевать большие лобовые сопротивления грунта при приемлемой энергоемкости процесса. Исследования выполнены на основе волновой теории распространения напряжений в погружаемой трубе и грунте. Проведен сравнительный анализ этих способов прокола по скорости проходки, потребляемой мощности и энергоемкости процесса. Получены зависимости средней скорости погружения трубы и потребляемой мощности от величины лобового сопротивления грунта, а также от глубины погружения в грунт для процессов вибропрокола и виброударно-вдавляющего прокола. Показаны особенности способа прокола в четвертьволновом резонансном режиме при работе в грунтах разной степени плотности. Даются рекомендации по техническим характеристикам установок для прокола, работающих в четвертьволновом резонансном режиме.

**Ключевые слова:** вибропрокол, виброударно-вдавляющий прокол, четвертьволновой резонансный режим, бестраншейная прокладка трубопроводов.

### COMPARATIVE ANALYSIS OF VIBRATION MEANS OF SOIL PUNCTURE FOR TRENCHLESS PIPE-LAYING

**Annotation.** Considered are the questions of defining the conditions of rational use of vibration puncture and vibro-impact-pressing puncture for trenchless laying of pipes in quarter wave resonance mode. The aim has been to increase the productivity through higher speed of driving, penetration capacity, possibility to overcome the great frontal resistance of soil at acceptable energy consumption. The studies have been fulfilled on the base of wave theory of stress propagation in going downward pipe and in soil. Comparative analysis of the puncture means in respect to speed of driving and power consumption of the process has been carried out. The dependencies of average speed of introducing the pipe and of consumed power on frontal resistance of soil and the depth of dipping in soil have been obtained for vibration and vibro-impact-pressing puncture processes. The peculiarities of puncture means in quarter wave resonance mode when working in soils of different density are shown. Recommendations on technical characteristics of puncture equipment operating in quarter wave resonance mode are given.

**Key words:** vibration puncture, vibro-impact-pressing puncture, quarter wave resonance mode, trenchless pipe-laying.