

**II. МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАТЕРІАЛООБРОБКА****Кірієнко О.А.**

к.т.н., доцент

*Національний технічний  
університет України  
«Київський  
політехнічний  
інститут» ім. Ігоря  
Сікорського*

**Kirienco E.**

*NTUU «Igor Sikorsky Kyiv  
Polytechnic Institute»*

**УДК 624.132.334****ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ  
СПОСОБІВ ВІБРОПРОКОЛУ ТА  
ВІБРОПРОДАВЛЮВАННЯ  
ДОВГОМІРНИХ ТРУБ У  
ЗВУКОРЕЗОНАНСНИХ РЕЖИМАХ**

*Дана стаття продовжує цикл статей, присвячених дослідженню звукорезонансних режимів роботи установок для прокладання труб вібраційними методами з метою підвищення їх продуктивності за рахунок збільшення швидкості проходки, 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. Порівняльний аналіз способів вібропроколу та вібропродавлювання довгомірних труб у звукорезонансних режимах, що проведено у даній роботі, дає можливість визначити області раціонального застосування цих методів і розробити в подальшому технічні вимоги до нових звукорезонансних установок.*

***Ключові слова:** безтраншейна прокладка трубопроводів, прокладання труб вібраційними методами, вібропрокол, вібропродавлювання, «три-чвертьхвильовий», «п'ять-чвертьхвильовий» звукорезонансні режими.*

**Постановка проблеми.** При безтраншейному прокладанні трубопроводів через різноманітні природні та штучні перешкоди поширення набули вібраційні способи прокладання труб – вібропрокол і вібропродавлювання (відповідно для труб діаметром 325 – 529 і 1400 мм).

У роботах [1-3] були розглянуті особливості роботи в звукорезонансних режимах (чвертьхвильовому та непарно кратних йому), що підвищують продуктивність та проникаючу здатність установок для вібропроколу та вібропродавлювання в різних ґрунтових умовах при прийнятній енергоємності процесу.

**Формування мети дослідження.** У даній статті наведено результати порівняльного аналізу показників проходки (швидкості заглиблення труби та споживаної потужності) при прокладанні труб довжиною 100-200 м способами вібропроколу та вібропродавлювання у звукорезонансних режимах. Такий аналіз дасть можливість чітко розмежувати області найбільш раціонального застосування звукорезонансних режимів у залежності від способу прокладки труб, а потім

розробити технічні вимоги до нових звукорезонансних установок для вібропроколу та вібропродавлювання. Дослідження були проведені для труб діаметром 529 мм (вібропрокол) та 1400 мм (вібропродавлювання) довжиною 100, 150 і 200 м.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Схема установки для вібропроколу, математична модель та система рівнянь, що описують процеси вібропроколу та вібропродавлювання у звукорезонансних режимах, наведені у роботі [1]. Теоретичним підґрунтям цих режимів є використання поздовжнього пружного резонансу стовбура елемента, що заглиблюється [4]. Параметри ґрунту приймалися усередненими за [5].

Для процесу вібропроколу вирішальне значення має лобовий опір ґрунту, який здійснює величезний вплив на показники проходки. Тому налаштування вібросистеми здійснюється на «екстремальний» випадок, тобто момент «стопоріння» труби об тверді включення в ґрунті. Методику розрахунку резонансних частот для процесу вібропроколу розглянуто у роботі [1].



У процесі вібропродавлювання внаслідок того що ґрунтовий керн, що заповнює трубу, безперервно примусово усувається одним із відомих способів [6], вважаємо лобовий опір сталим і мінімальним. Таким чином, більш важливим є вплив великого бокового опору ґрунту, що зростає пропорційно глибині проходки, як і в процесі вібропроколу. При вібропродавлюванні доцільно використовувати те ж частотне налаштування вібратора, що і при вібропроколі, тому що завжди є небезпека різкого зростання сил лобового опору ґрунту при ущільненні ґрунтового керну до критичного значення («пальний ефект»). Тож методика розрахунку резонансних частот для обох способів прокладки труб – проколу і продавлювання – однакова [1].

При порівнянні показників проходки в звукорезонансних режимах для вібропроколу та вібропродавлювання однаковими приймаються наступні параметри: довжина труби, що прокладається, (100, 150, 200 м), маса жорстко приєднаних до труби частин установки (2000 кг), зони пружності ґрунту (по лобовій поверхні труби 0,5 см, по боковій – 0,2 см), сила сухого тертя ґрунту по боковій поверхні труби на 1 м довжини заглиблення (6 кН/м), коефіцієнт пружної жорсткості ґрунту по боковій поверхні (1000 кН/см), амплітуда збурювальної сили вібратора (600 – 1000 кН). Показники проходки для обох способів прокладки труб порівнюються в однакових частотних режимах.

Теоретично характер змінення швидкості заглиблення в залежності від глибини проходки для вібропроколу та вібропродавлювання має бути різним, тому що лобові опори на забойному кінці труби суттєво різняться: достатньо великий при вібропроколі (глухий конусний наконечник) і мінімальний при вібропродавлюванні (відкритий кінець труби та постійне вилучення ґрунтового керна). Цим обставинам приділялася особлива увага.

На рис. 1 наведено залежності середньої швидкості заглиблення труби  $V_{сер}$  та

споживаної потужності  $P$  від глибини проходки при вібропроколі (криві 1 і 1') та вібропродавлюванні (криві 2 і 2') в непарнократних резонансних режимах – «три-чвертьхвильовому» (криві 1 і 2) та «п'ять-чвертьхвильовому» (криві 1' і 2'). Амплітуда збурювальної сили  $F_0 = 600 \text{ кН}$ . Частоти «три-чвертьхвильового» режиму при вібропроколі та вібропродавлюванні близькі за величиною і складають відповідно 32,3 Гц (криві 1) і 35 Гц (криві 2). Незначна розбіжність частот пояснюється різною вагою труб для вібропроколу та вібропродавлювання [1,3]. Із рис. 1 видно, що при вібропроколі в «три-чвертьхвильовому» режимі (крива 1) швидкість  $V_{сер}$  із збільшенням глибини  $L$  плавно знижується, однак вона достатня для успішного завершення проходки довжиною 100 м.

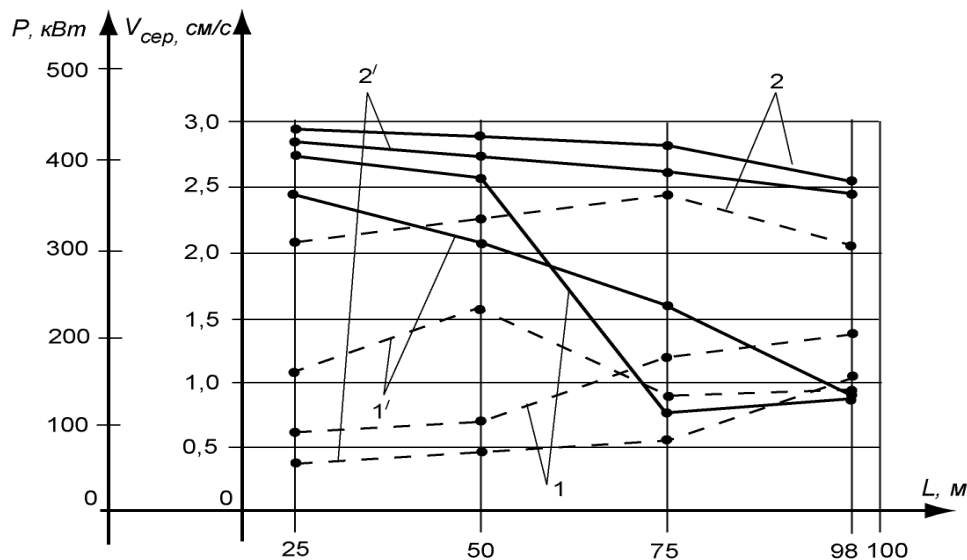


Рис. 1. Порівняльні залежності середньої швидкості заглиблення труби (—) і споживаної потужності (---) від глибини проходки при вібропроколі (1, 1') і вібропродавлюванні (2, 2') для труби довжиною 100 м у «три-чвертьхвильовому» (1 і 2) і «п'ять-чвертьхвильовому» (1' і 2') резонансних режимах

Лобовий опір ґрунту ( $Q = 100 \text{ кН}$ ) має суттєвий вплив на процес проходки, тому при наявності бокового та лобового опорів

швидкість  $V_{сер}$  має менше значення та більш різкий характер зниження, ніж при вібропродавлюванні (лобовий опір



$Q = 10 \kappa H$ ). Наприкінці проходки величина  $V_{сер}$  при вібропроколі дорівнює 0,9 см/с, а при вібропродавлюванні (крива 2) – 2,52 см/с, тобто більше в 2,8 рази.

Характер змінення споживаної потужності  $P$  в обох випадках приблизно однаковий, за винятком останнього етапу проходки (після 75 м). Потужність  $P$  при вібропродавлюванні вище, ніж при вібропроколі в середньому в 2-3 рази, однак внаслідок більшої швидкості  $V_{сер}$  енергоємність процесу вібропродавлювання у другій половині проходки дещо нижча (наприкінці проходки в 1,9 рази).

У «п'ять-чвертьхвильовому» режимі резонансні частоти при вібропроколі та вібропродавлюванні складають відповідно 55 і 58 Гц. Частоти дещо різняться через різну вагу труби [1,3]. У цьому випадку швидкість  $V_{сер}$  при вібропроколі (крива 1') змінюється із збільшенням глибини заглиблення дуже різко, починаючи з відмітки 50 м (з 2,56 до 0,75 см/с), але на останньому етапі проходки швидкість несуттєво зростає і складає на відмітці 98 м – 0,9 см/с, тобто установка для вібропроколу в цьому режимі проходить проектну довжину свердловини.

При вібропродавлюванні (крива 2') швидкість  $V_{сер}$  змінюється дуже повільно і плавно – від 2,79 до 2,37 см/с, що більш ніж

швидкість при вібропроколі наприкінці проходки в 2,6 рази. Споживана потужність  $P$  при вібропродавлюванні в середньому менша за потужність при вібропроколі в 3 рази (криві 1' і 2'), за винятком останнього етапу проходки, де потужності близькі за величиною.

Із рис. 1 також видно, що при вібропроколі трубою довжиною 100 м кращі показники проходки забезпечуються у «три-чвертьхвильовому» режимі, а при вібропродавлюванні обидва частотних режими – «три-чвертьхвильовий» і «п'ять-чвертьхвильовий» – забезпечують стабільну та високу швидкість проходки, однак енергетично більш вигідним є «п'ять-чвертьхвильовий» режим (споживана потужність  $P$  у цьому режимі приблизно у 2 рази менше, ніж у «три-чвертьхвильовому»).

На рис. 2 наведено порівняльні залежності швидкості  $V_{сер}$  і споживаної

потужності  $P$  від глибини проходки при вібропроколі (криві 1 і 1') та вібропродавлюванні (криві 2 і 2') для труби довжиною 150 м. Резонансні частоти для «три-чвертьхвильового» режиму складають при вібропроколі (1) 22,3 Гц, при вібропродавлюванні (2) – 24,5 Гц. Із збільшенням довжини труби різниця між частотами зменшується [1]. Амплітуда збурювальної сили вібратора  $F_0 = 800 \kappa H$ .

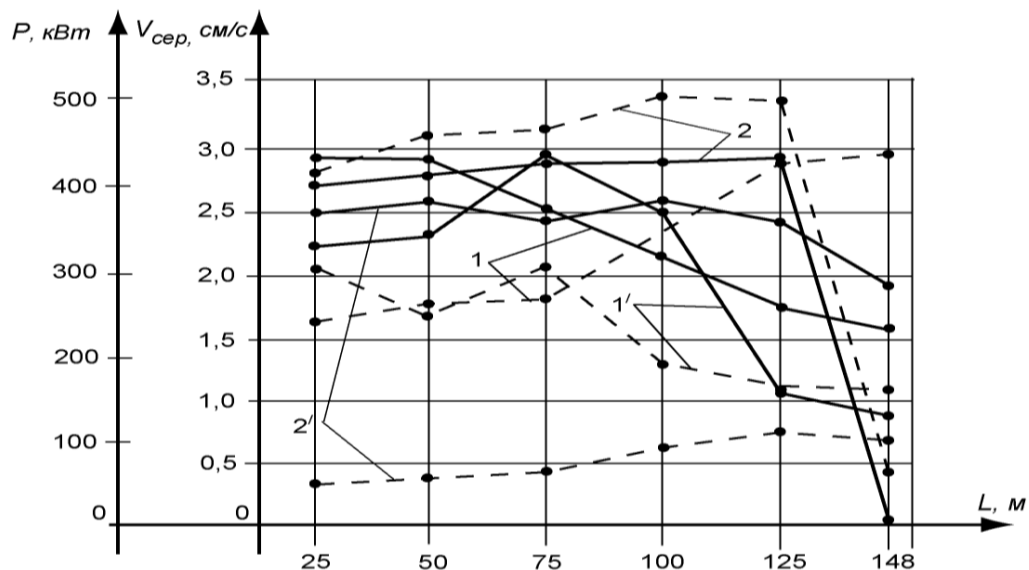
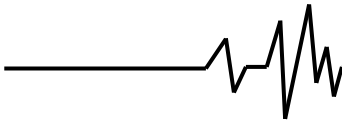


Рис.2. Порівняльні залежності середньої швидкості заглиблення труби (—) і споживаної потужності (----) від глибини проходки при вібропроколі (1, 1') і вібропродавлюванні (2, 2') для труби довжиною 150 м у «три-чвертьхвильовому» (1 і 2) і «п'ять-чвертьхвильовому» (1' і 2') резонансних режимах



Із рис. 2 видно, що у «три-чвертьхвильовому» режимі (криві 1 і 2) при прокладанні труби довжиною 150 м різна ефективність способів вібропроколу та вібропродавлювання стає очевидною. При вібропроколі (крива 1) в цьому режимі швидкість  $V_{сер}$  хоча і знижується із збільшенням глибини проходки, але більш плавно, і наприкінці проходки сягає 1,59 см/с, тобто установка для вібропроколу у «три-чвертьхвильовому» режимі успішно долає проектну довжину свердловини. При вібропродавлюванні (крива 2) у цьому режимі швидкість  $V_{сер}$  до відмітки 125 м вище, ніж при вібропроколі (на 12-20% в середині шляху), та змінюється несуттєво, однак після відмітки 125 м різко знижується до нуля і проходка припиняється, не досягаючи проектною довжини 150 м. Для відновлення проходки необхідно збільшувати збудувальну силу вібратора  $F_0$ . Споживана потужність при вібропроколі (крива 1) нижче, ніж при вібропродавлюванні (крива 2), в середньому у 1,5 – 1,7 рази.

Залежності, подані на рис. 2, підтверджують висновок про більш високу ефективність у «три-чвертьхвильовому» режимі саме процесу вібропроколу, а при вібропродавлюванні трубами довжиною більш ніж 100 м цей режим не рекомендується.

Резонансні частоти для вібропроколу (крива 1') і вібропродавлювання (крива 2') у «п'ять-чвертьхвильовому» режимі складають відповідно 37,7 і 40 Гц. Решта параметрів цих процесів приймаються такими ж,

як у попередньому випадку. Характер зміння швидкості заглиблення труби  $V_{сер}$  із глибиною при вібропроколі (крива 1') у «п'ять-чвертьхвильовому» режимі відрізняється від характеру її зміння в «три-чвертьхвильовому» режимі (крива 1). У даному випадку вона різко змінюється по довжині проходки, сягаючи найбільшого значення у середині шляху – 2,94 см/с – та знижуючись наприкінці проходки до 0,8 см/с. Найбільш різке її зниження починається від відмітки 100 м. У той же час при вібропродавлюванні у «п'ять-чвертьхвильовому» режимі (крива 2') швидкість  $V_{сер}$  змінюється із збільшенням глибини достатньо плавно (2,56 – 2,52 см/с), знижуючись наприкінці проходки до 1,86 см/с.

На відмітці 148 м швидкість  $V_{сер}$  при вібропродавлюванні (крива 2') вище за швидкість при вібропроколі (крива 1') в 2,3 рази. Споживана потужність  $P$  при вібропроколі вище за потужність при вібропродавлюванні у «п'ять-чвертьхвильовому» режимі на середньому етапі проходки у 5 разів, наприкінці проходки – у 1,6 рази.

Із рис. 2 видно, що «п'ять-чвертьхвильовий» режим виявляється більш ефективним при вібропродавлюванні ніж при вібропроколі (за швидкістю та енергоємністю), що підтверджує теоретичне припущення про неоднакову ефективність непарнократних резонансних режимів при різних способах проходки (у зв'язку з різними граничними умовами на забойному кінці труби).

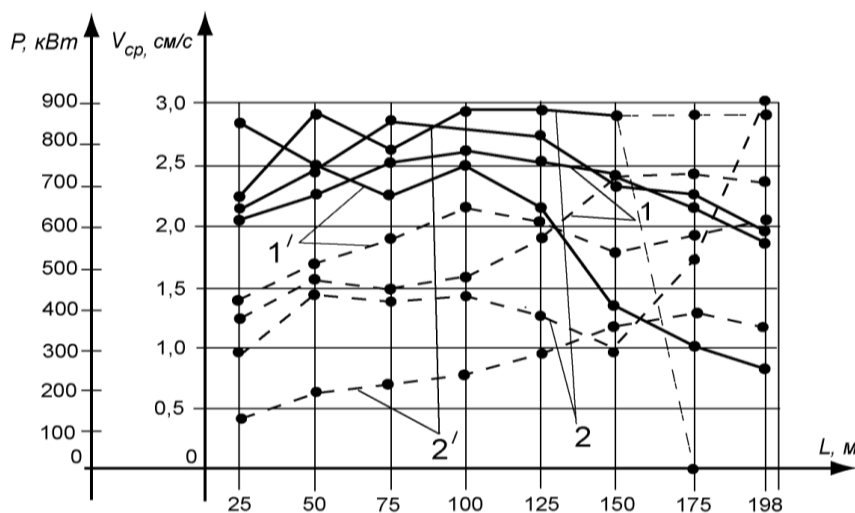
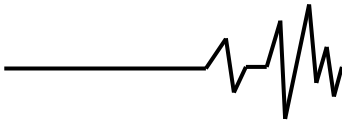


Рис.3. Порівняльні залежності середньої швидкості заглиблення труби (—) і споживаної потужності (----) від глибини проходки при вібропроколі (1, 1') і вібропродавлюванні (2, 2') для труби довжиною 200 м у «три-чвертьхвильовому» (1 і 2) і «п'ять-чвертьхвильовому» (1' і 2') резонансних режимах



На рис. 3 наведені порівняльні залежності швидкості  $V_{сер}$  та споживаної

потужності  $P$  від глибини проходки для труби довжиною 200 м при вібропроколі (криві 1 і 1') та вібропродавлюванні (криві 2 і 2') в звукорезонансних режимах. Резонансні частоти «три-чвертьхвильового» режиму складають для вібропроколу (крива 1) – 17,2 Гц, для вібропродавлювання (крива 2) – 17 Гц, тобто практично однакові, що пояснюється збільшенням довжини труби до 200 м, коли вплив невіднесеної маси вібратора [1] вже несуттєвий. Амплітуда збурювальної сили вібратора при вібропроколі прийнята 1000 кН, а при вібропродавлюванні – від 600 кН (початкова амплітуда зменшена внаслідок великих амплітуд коливань самої труби в «три-чвертьхвильовому» режимі) до 1100 кН. Решта параметрів вібропроколу та вібропродавлювання прийняті такі ж, як у попередньому випадку.

Із рис. 3 видно, що при вібропроколі (крива 1) у «три-чвертьхвильовому» режимі швидкість, як і раніше, достатньо висока по всій довжині проходки і складає наприкінці її 1,82 см/с. Таким чином, установка для вібропроколу успішно долає в цьому резонансному режимі проектну довжину свердловини. При вібропродавлюванні (крива 2) швидкість  $V_{сер}$  різко коливається на початковому етапі проходки (до відмітки 100 м), потім до відмітки 150 м тримається на високому рівні – 2,9 см/с, а після відмітки знижується до нуля (на графіку – тонка пунктирна лінія). Для відновлення проходки після відмітки 150 м приходиться збільшувати амплітуду збурювальної сили вібратора  $F_0$  до 800 кН (штрих-пунктирні ділянки кривих 2), швидкість  $V_{сер}$  при цьому складає 2,75 см/с, але після відмітки 175 м вона знов падає до нуля, і тільки після збільшення сили  $F_0$  до 1100 кН проходка відновлюється зі швидкістю 2,79 см/с, з цією ж швидкістю вона закінчується на проектній відмітці 200 м.

Споживана потужність  $P$  при вібропродавлюванні різко зростає із збільшенням амплітуди збурювальної сили  $F_0$  і наприкінці проходки (при  $F_0 = 1100$  кН) складає 931,6 кВт, що вище потужності при вібропроколі на цій відмітці на 24%. Зрозуміло, що при вібропроколі споживана потужність  $P$  також дуже велика (складає наприкінці проходки 710 кВт), однак такі значні витрати енергії неминучі при прокладанні труб настільки великої довжини (при інших частотних режимах, не резонансних, прокладка взагалі

неможлива). «Три-чвертьхвильовий» режим є ефективним при прокладанні труб способом вібропроколу, а при вібропродавлюванні приходиться ступінчасте збільшувати збурювальну силу, збільшуючи і без того дуже великі витрати потужності.

Наприкінці порівняльного аналізу способів вібропроколу та вібропродавлювання розглянемо показники проходки в «п'ять-чвертьхвильовому» режимі (криві 1' і 2'). Резонансні частоти «п'ять-чвертьхвильового» режиму для вібропроколу та вібропродавлювання в даному випадку рівні та складають 30 Гц, амплітуда збурювальної сили вібратора –  $F_0 = 1000$  кН. Із рис. 3 видно, що

при вібропроколі (крива 1') швидкість  $V_{сер}$  у цьому режимі змінюється дуже різко по довжині свердловини і наприкінці проходки складає всього 0,79 см/с (початкова швидкість на відмітці 25 м складає 2,9 см/с). При вібропродавлюванні (крива 2') швидкість  $V_{сер}$  змінюється ні так різко, маючи максимальне значення (2,95 см/с) на середньому етапі проходки, наприкінці проходки вона складає 1,91 см/с, що більш ніж швидкість при вібропроколі в 2,5 рази. Споживана потужність  $P$  при вібропродавлюванні на всьому проектному шляху заглиблення менш ніж потужність при вібропроколі в 1,5...3,5 рази. Так, на відмітці 50 м швидкості при вібропроколі (1') і вібропродавлюванні (2') різняться лише на 5%, а потужність  $P$  при вібропроколі більш ніж при вібропродавлюванні в 2,5 рази.

Таким чином, із рис. 3 видно, що вібропродавлювання в «п'ять-чвертьхвильовому» режимі набагато ефективніше, ніж вібропрокол, як за швидкістю проходки, так і енергетично.

#### **Висновки.**

1. При прокладанні довгомірних труб способом вібропроколу найбільш ефективним є «три-чвертьхвильовий» режим роботи установки.

2. Процес вібропродавлювання довгомірних труб ефективніше проводити в «п'ять-чвертьхвильовому» режимі.

3. Отримані результати порівняльного аналізу способів вібропроколу і вібропродавлювання в звукорезонансних режимах дозволяють більш раціонально проектувати нові звукорезонансні установки для безтраншейної прокладки труб.

#### **Список використаних джерел**

1. Кірієнко О.А. Застосування звукорезонансних режимів роботи при



безтраншейному прокладанні труб методом вібропроколу / О. А. Кірієнко // Вібрації в техніці та технологіях. – 2011. – № 2. – С. 72-77.

2. Кірієнко О.А. Застосування непарно кратних чвертьхвильовому звукорезонансних режимів при безтраншейному прокладанні довгомірних труб способом вібропроколу / О. А. Кірієнко // Вібрації в техніці та технологіях. – 2016. – № 1. – С. 30-35.

3. Кірієнко О. А. Дослідження процесу вібропродавлювання довгомірних труб у звукорезонансних режимах / О. А. Кірієнко // Вібрації в техніці та технологіях. – 2017. – № 1. – С. 29-34.

4. Дейвис Р.М. Волны напряжений в твердых телах / Р.М. Дейвис // М., ИЛ, 1961. – 103 с.

5. Исследование вибрационного и виброударного погружения свай // Труды ВНИИТСа, вып. 71. Под ред. А.С. Головачева. М.: Транспорт, 1968. - 186с.

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

#### Список джерел в транслітерації

1. Kiriienko O.A. Zastosuvannia zvukorezonansnykh rezhymiv roboty pry beztransheinomu prokladanni trub metodom vibroprokolu. / O.A. Kiriienko // Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh. – 2011. – № 2. – P. 72-77.

2. Kiriienko O.A. Zastosuvannia neparno kratnykh chvertkhvylivomomu zvukorezonansnykh rezhymiv pry beztransheinomu prokladanni dovgomirnykh trub sposobom vibroprokolu / O.A. Kiriienko // Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh. – 2016. – № 1. – P. 30-35.

3. Kiriienko O.A. Doslidzhennya protsesu vibroprodavlyuvannya dovgomirnih trub u zvukorezonansnih rezhimah/ O.A. Kiriienko // Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh. –2017. – № 1. – P. 29-34.

4. Deivys R.M. Volnyi napriazhenyi v tverdyykh telakh / R.M. Deivys // М., YL, 1961. – 103 P.

5. Issledovaniya vibratsionnogo i vibroudarnogo pogrucheniya svay. // Tr. VNIITS, vyp.71. М., «Transport». 1968.

6. Kershenbaum N.Ya., Vibrometod v prokhodke gorizontalnykh skvazhin / N.Ya. Kershenbaum, V.I. Minayev // «Nedra». 1968. – 152 P.

#### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ВИБРОПРОКОЛА И ВИБРОПРОДАВЛИВАНИЯ ДЛИННЫХ ТРУБ В ЗВУКОРЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМАХ

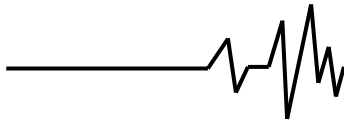
**Аннотация.** Данная статья продолжает цикл статей, посвященных исследованию звукорезонансных режимов работы установок для прокладки труб вибрационными методами с целью повышения их производительности – за счет увеличения скорости проходки, проникающей способности, возможности преодоления больших лобовых сопротивлений грунта при приемлемой энергоемкости процесса. Исследования выполнены на основе волновой теории распространения напряжений в погружаемой трубе. Сравнительный анализ способов вибропрокола и вибропродавливания длинных труб в звукорезонансных режимах, проведенный в данной работе, позволяет определить области рационального применения этих методов и разработать в дальнейшем технические требования к новым звукорезонансным установкам.

**Ключевые слова:** бестраншейная прокладка трубопроводов, прокладка труб вибрационными методами, вибропрокол, вибропродавливание, «три-четвертьволновой», «пять-четвертьволновой» режимы.

#### COMPARATIVE ANALYSIS OF VIBRATION PIERCING METHODS OF LONG-MEASURING PIPES IN WAVE RESONANCE MODES

**Abstract.** This article continues the series of works, which are devoted to studies of vibration methods of pipe laying, with purpose of increasing 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 vibration piercing methods of long-measuring pipes in wave resonance modes that has been performed in current article, allows to determine area of rational application of these methods and to develop technical requirements for a new sound-resonance units.

**Keywords:** trenchless laying of pipelines, vibration methods of pipe laying, vibration piercing, “three-quarter” and “five-quarter” wave resonance modes.



***Відомості про авторів***

**Кірієнко Олена Анатоліївна** – канд. техн. наук, доцент кафедри прикладної механіки НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37).

**Кириєнко Елена Анатольевна** – канд. техн. наук, доцент кафедри прикладної механіки НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (03056, г. Киев, пр. Победы, 37).

**Kiriencko Elena** – Candidate of Technical Sciences, associate professor of Applied Mechanics Department of NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (03056, Kyiv, Prospekt Peremohy, 37).