

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

ЗАСТОСУВАННЯ НЕПАРНО КРАТНИХ ЧВЕРТЬХВИЛЬОВОМУ ЗВУКОРЕЗОНАНСНИХ РЕЖИМІВ ПРИ БЕЗТРАНШЕЙНОМУ ПРОКЛАДАННІ ДОВГОМІРНИХ ТРУБ СПОСОБОМ ВІБРОПРОКОЛУ

У статті розглянуті питання застосування непарно кратних чвертьхвильовому звукорезонансних режимів роботи установок для вібропроколу при безтраншейному прокладанні труб довжиною 100...200 м. Дана стаття продовжує цикл статей, присвячених дослідженню звукорезонансних режимів роботи установок для вібропроколу 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. Розглянуті особливості роботи в «три-чвертьхвильовому» і «п'ять-чвертьхвильовому» резонансних режимах при прокладанні труб діаметром 529 мм довжиною 100, 150 і 200 м. Проаналізовані залежності середньої швидкості заглиблення труби та споживаної потужності від величини лобового та бокового опорів ґрунту, глибини проходки, амплітуди збурювальної сили вібратора. Проведено порівняння за ефективністю та енергоємністю «три-чвертьхвильового» і «п'ять-чвертьхвильового» резонансних режимів, дані рекомендації для їх реалізації.

Ключові слова: вібропрокол, непарно кратні чвертьхвильовому резонансні режими, «три-чвертьхвильовий» і «п'ять-чвертьхвильовий» резонансні режими, безтраншейна прокладка трубопроводів.

Вступ. У роботах [1...3] було показано переваги застосування високочастотних резонансних режимів (зокрема, чвертьхвильового резонансного режиму) при безтраншейному прокладанні труб діаметром 325 мм довжиною до 40...50 м вібраційними методами (вібропроколом та віброударним проколом). При будівництві магістральних трубопроводів труби таких параметрів найчастіше прокладаються під автомобільними, шосейними дорогами та залізничними насипами при спорудженні безтраншейних переходів. Для таких труб чвертьхвильовий резонансний режим забезпечує високу швидкість проходки при прийнятній потужності в ґрунтах слабкої та середньої щільності, а також успішне подолання великих лобових

опорів ґрунту, зокрема, твердих ґрунтових включень.

Але при будівництві магістральних трубопроводів доводиться перетинати не тільки автомобільні та залізничні шляхи, а й різноманітні водні перешкоди – річки, озера, водойми. Одним з методів перетину таких перешкод є прокладання трубопроводів під дном водойми, у цьому випадку довжина переходу може складати 100...200 м і більше.

Застосування при прокладанні труб такої довжини чвертьхвильового резонансного режиму обмежується складністю реалізації достатньо низької частоти при великій збурювальній силі вібратора, значним зростанням внутрішніх втрат в трубі, що різко погіршує проникаючу здатність установок для проколу.



У таких випадках може виявитися доцільним використання непарно кратних чвертьхвильовому звукорезонансних режимів – «три-чвертьхвильового», «п'ять-чвертьхвильового» тощо, які повністю або частково зберігають його позитивні якості. За рахунок збільшення (в певних межах) частоти вібрації в цих режимах втрати в трубі відповідно зменшуються [4], що призводить до збільшення проникаючої здатності та продуктивності установок для проколу.

Мета даної роботи – визначити ефективність застосування та особливості роботи установок для проколу в «три-чвертьхвильовому» та «п'ять-чвертьхвильовому» резонансних режимах при прокладанні труб діаметром 529 мм (з конусним наконечником рівного діаметру) довжиною 100, 150 і 200 м із урахуванням необхідності долання лобового та лінійно зростаючого з глибиною бокового опорів ґрунту.

Модель та методика розрахунку непарно кратних чвертьхвильовому резонансних режимів, на які налаштовується вібратор, аналогічні викладеним у роботі [1]. Параметри ґрунту приймалися усередненими за [5, 6].

Основна частина. На рис. 1 наведені залежності середньої швидкості заглиблення труби $V_{сер}$ та споживаної потужності P від глибини проходки (бокового опору ґрунту) в «три-чвертьхвильовому» (крива 1) та «п'ять-чвертьхвильовому» (криві 2 і 3) резонансних режимах.

Ці залежності отримані за наступних параметрів процесу: сила лобового опору ґрунту в зоні пластичних деформацій 100 кН, зона пружності по лобовій поверхні труби 0,5 см, амплітуда збурювальної сили вібратора 600 кН (стала для обох режимів), сухе тертя на 1 м бокової поверхні труби, заглибленої в ґрунт, $W = 6$ кН/м (криві 1, 2) і $W = 4$ кН/м (крива 3). Для труби довжиною 100 м із приєднаною масою вібратора 2000 кг резонансні частоти «три-чвертьхвильового» і «п'ять-чвертьхвильового» режимів складають відповідно 32 і 55 Гц. Межі змінення глибини проходки вибрані від 25 м (початкова ділянка проходки в даному випадку не представляє особливих труднощів) до 98 м з таким розрахунком, щоб мали місце і боковий, і лобовий опори ґрунту.

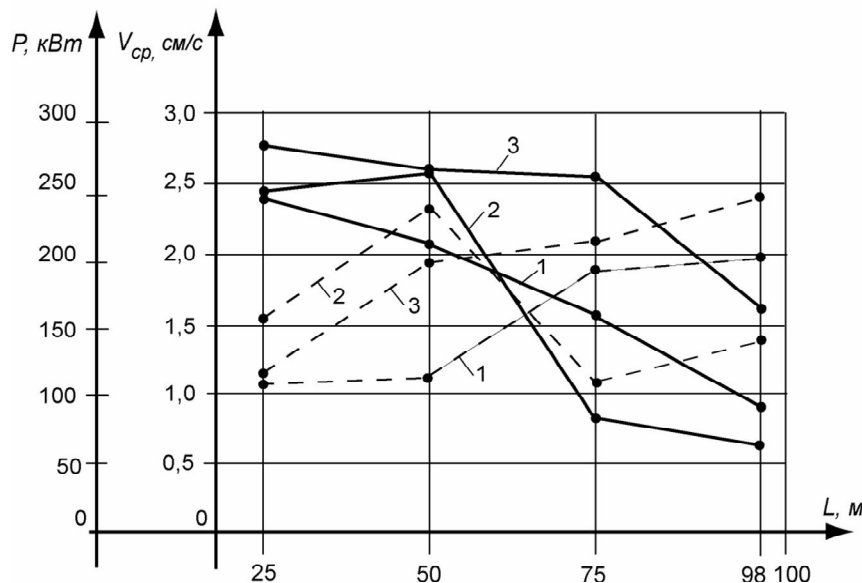


Рис. 1. Залежності середньої швидкості заглиблення (—) і споживаної потужності (---) від глибини проходки для труби довжиною 100 м

Із рис. 1 видно, що в «три-чвертьхвильовому» режимі (крива 1) швидкість $V_{сер}$ достатньо висока для успішного проходження всієї свердловини, плавно знижується та складає наприкінці проходки 0,9 см/с. Споживана потужність P досягає наприкінці проходки 206 кВт, енергоємність процесу (витрати енергії на 1 м довжини

проходки) – близько 380 кВт·хв/м, що можна вважати прийнятним для труб такої довжини.

У «п'ять-чвертьхвильовому» режимі за сухого тертя ґрунту $W = 6$ кН/м (крива 2) швидкість $V_{сер}$ змінюється різкіше, ніж у «три-чвертьхвильовому». Однак, наприкінці проходки швидкість $V_{сер}$ ще достатня для успішного завершення процесу вібропроколу.



При $W = 4$ кН/м швидкість $V_{сер}$ у «п'ять-чвертьхвильовому» режимі (крива 3) достатньо висока та стабільна на переважній частині ділянки проходки (2,55 см/с) та починає знижуватися лише на останніх 25 м, складаючи наприкінці проходки 1,7 см/с, що цілком прийнятно на практиці. Споживана потужність P за сухого тертя $W = 6$ кН/м, як і швидкість, змінюється з глибиною проходки різкіше, ніж у «три-чвертьхвильовому», що пов'язано не тільки з різкими коливаннями швидкості $V_{сер}$, але й амплітуди коливань самої труби, складаючи наприкінці проходки 141 кВт. При $W = 4$ кН/м (крива 3) потужність P з глибиною плавно зростає та досягає наприкінці заглиблення приблизно 232 кВт.

Для «три-чвертьхвильового» режиму за таких же умов (на рис. 1 не показано) швидкість $V_{сер}$ достатньо стабільна на всій глибині проходки і складає наприкінці її 2,42 см/с, а потужність – 189 кВт.

Із рис. 1 можна зробити висновок, що проникаюча здатність установок при прокладанні труб довжиною 100 м у «три-чвертьхвильовому» і «п'ять-чвертьхвильовому» режимах прийнятна для практики. Однак «три-чвертьхвильовий» забезпечує більш стабільну та плавно змінну швидкість заглиблення, ніж «п'ять-чвертьхвильовий» режим, який в більший мірі піддається негативному впливу бокового опору ґрунту (криві 2 і 3). Потужність P у «три-чвертьхвильовому» режимі (крива 1) за рівних умов у середньому декілька нижче, ніж у «п'ять-чвертьхвильовому» режимі (крива 2).

Слід зазначити, що при прокладанні таких довгомірних труб (100 - 200 м), великого значення набуває вибір амплітуди збурювальної сили вібратора F_0 : з одного боку, її величина має бути достатньою для створення коливань в трубі великої ваги (наприклад, вага труби довжиною 200 м – 20400 кг), а з іншого – завищення цієї величини призводить до нераціонального збільшення споживаної потужності, створенню занадто великих амплітуд коливань в самій трубі, що в свою чергу створює небезпечні для міцності внутрішні напруження в ній. Тому постає нова задача пошуку раціональної величини F_0 .

На рис.2 наведені залежності швидкості $V_{сер}$ та споживаної потужності від глибини проходки при прокладанні труби довжиною 200 м у «три-чвертьхвильовому» (крива 1) та «п'ять-чвертьхвильовому» (криві 2 і 3) режимах. Результати отримані за наступних параметрів процесу: резонансні частоти відповідно 17 і 30 Гц, сухе тертя $W = 6$ кН/м, амплітуда збурювальної сили 1000 кН (криві 1 і 2) і 800 кН (крива 3), межі змінювання глибини проходки від 25 до 198 м, решта параметрів, як у попередніх випадках.

Із рис. 2 видно, що в «три-чвертьхвильовому» режимі (крива 1), як і раніше (див. рис.1), швидкість $V_{сер}$ достатньо висока та стабільна на всій глибині проходки, плавно знижується і складає наприкінці її 1,8 см/с, тобто в цьому режимі забезпечується успішне подолання проектного шляху заглиблення.

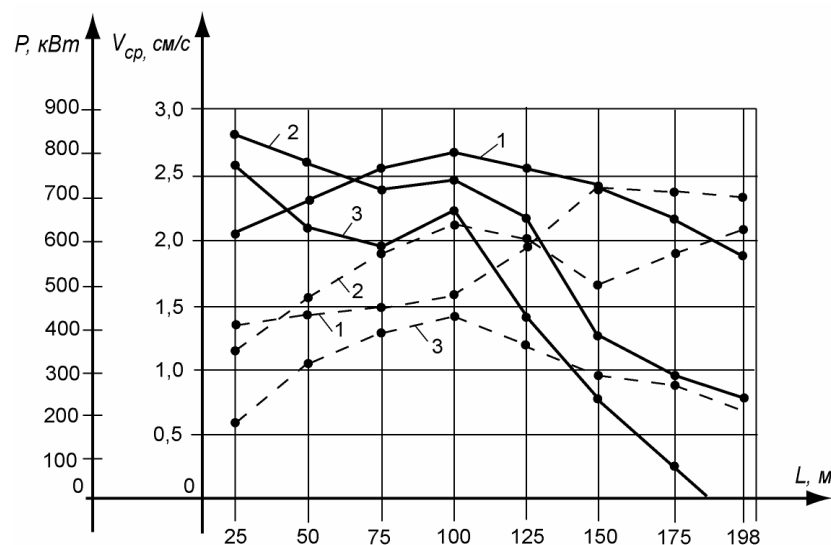
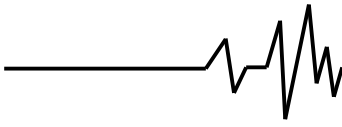


Рис. 2. Залежності середньої швидкості заглиблення (—) і споживаної потужності (----) від глибини проходки для труби довжиною 200 м



Споживана потужність P в першій половині проходки зростає несуттєво (крива 1), а після відмітки 100 м починає різко зростати. Тут дається взнаки, вочевидь, різке збільшення складової P , що йде на подолання бокового опору ґрунту. Наприкінці проходки потужність P стабілізується та складає близько 710 кВт. Енергоємність процесу в цьому режимі – 650 кВт·хв/м, що при прокладанні таких довгомірних труб можна вважати прийнятним.

У «п'ять-чвертьхвильовому» режимі (крива 2), як і раніше (див. рис.1), швидкість V_{cep} різко змінюється із збільшенням глибини проходки і значно знижується на останньому етапі заглиблення, складаючи наприкінці її лише 0,76 см/с, тобто менш ніж швидкість у «три-чвертьхвильовому» в 2,4 рази.

Потужність P у «п'ять-чвертьхвильовому» режимі (крива 2) також достатньо різко змінюється із збільшенням глибини проходки, складаючи наприкінці 613 кВт, тобто відрізняється від P в «три-чвертьхвильовому» режимі всього на 14%.

Таким чином, можна зробити висновок, що при прокладанні труб довжиною 200 м «три-чвертьхвильовий» режим забезпечує більш стабільну та високу швидкість проходки на всій проектній довжині свердловини, ніж «п'ять-чвертьхвильовий» режим. Споживані потужності в цих режимах відрізняються за величиною несуттєво.

По рис. 2 можна простежити також значення правильного вибору амплітуди збурювальної сили вібратора F_0 . Як приклад розглянемо показники проходки (швидкість і потужність) для «п'ять-чвертьхвильового» режиму при двох значеннях амплітуди F_0 : 1000 кН (крива 2) і 800 кН (крива 3).

При $F_0=1000$ кН швидкість V_{cep} , хоч і зменшується доволі різко на останньому етапі проходки, але складає наприкінці її 0,76 см/с, тобто вибрана величина F_0 дозволяє успішно пройти проектну довжину свердловини з прийнятними показниками.

У той же час зниження амплітуди F_0 до 800 кН (крива 3) призводить до того, що установка не може подолати всього проектного шляху заглиблення, так як швидкість V_{cep} дуже різко знижується на другому етапі проходки (від відмітки 100 м), складаючи при $L=150$ м вже тільки 0,76 см/с, а при L більш

175 м близько до нуля. Таким чином, проектна довжина шляху 200 м пройдена не буде.

Споживана потужність P із зменшенням амплітуди F_0 до 800 кН, природно, значно нижче, ніж при $F_0=1000$ кН, і складає на середньому етапі проходки не більш ніж 440 кВт (проти 660 кВт), а на завершальному етапі – близько 300 кВт. Незважаючи на повне припинення проходки ($V_{cep} \cong 0$), потужність

P не дорівнює нулю, тому що витрачається на підтримку пружних коливань (на внутрішні втрати), подолання бокового тертя ґрунту, а власне на проходку – дорівнює нулю (в звукорезонансних режимах повна потужність має декілька складових, що змінюються в процесі проколу).

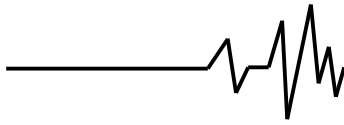
Отже, вибір більш високої збурювальної сили вібратора при прокладанні таких довгомірних труб виправданий складністю задачі. При необхідності можна вдатися до комбінованого завдання F_0 : на першому етапі проходки (до 100 м) прийняти $F_0=800$ кН, а на другому (більш 100 м) збільшити F_0 до 1000 кН. Як видно з рис. 2, швидкості в середині проходки (криві 2 і 3) близькі за величиною, а споживані потужності відрізняються більш, ніж на 30%.

Розглянемо залежності показників проходки від іншого важливого для процесу проколу фактора: лобового опору ґрунту.

На рис. 3 наведені залежності швидкості V_{cep} і потужності P від лобового опору ґрунту для труби довжиною 150 м у «три-чвертьхвильовому» (крива 1) і «п'ять-чвертьхвильовому» (крива 2) режимах.

Прийняті наступні параметри процесу: зона пружності ґрунту по лобовій поверхні труби 0,5 см, сухе тертя $W = 6$ кН/м, глибина попереднього заглиблення в ґрунт 75 м (половина шляху), амплітуда збурювальної сили вібратора 800 кН, резонансні частоти відповідно 22 і 38 Гц.

Із рис. 3 видно, що заглиблення труби зі збільшенням лобового опору ґрунту Q від 100 до 300 кН здійснюється достатньо успішно в обох режимах, хоча в «п'ять-чвертьхвильовому» режимі (крива 2) швидкість V_{cep} вище, ніж у «три-чвертьхвильовому» (крива 1). При $Q=400$ кН швидкість V_{cep} в «три-чвертьхвильовому» режимі (крива 1) різко знижується, складаючи всього 0,6 см/с, в той



час як у «п'ять-чвертьхвильовому» режимі $V_{ср}$ складає 1,86 см/с, тобто більше в 3 рази, і, вочевидь, є достатній запас енергії для подолання великого діапазону лобових опорів ґрунту. Споживана потужність P в діапазоні

лобових опорів, що розглядається (від 100 до 400 кН), у «п'ять-чвертьхвильовому» режимі (крива 2) значно більше, ніж у «три-чвертьхвильовому» (крива 1), приблизно в 2,3...2,45 рази.

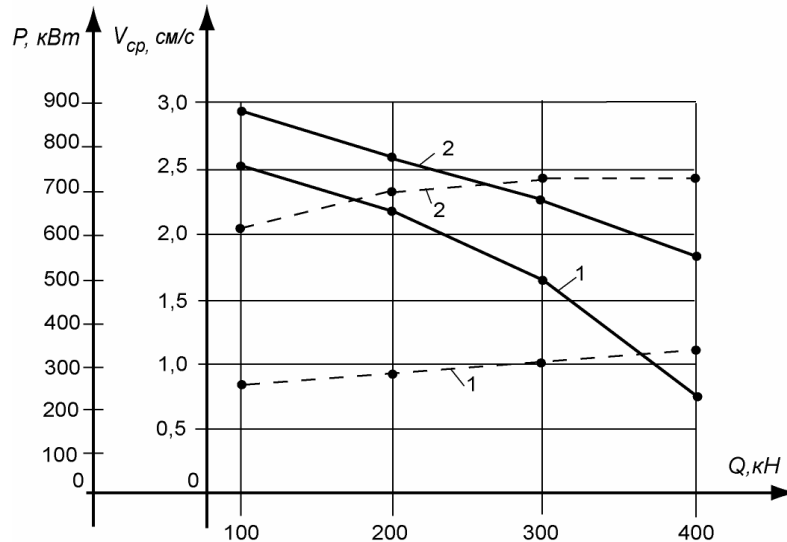


Рис. 3. Залежності середньої швидкості заглиблення (—) і споживаної потужності (---) лобового опору ґрунту для труби довжиною 150 м

Отже, у ґрунтах малої та середньої щільності (Q до 300 кН) «п'ять-чвертьхвильовий» режим енергетично менш вигідний, ніж «три-чвертьхвильовий», незважаючи на деякі переваги у швидкості проходки (приблизно на 20%). У щільних ґрунтах при Q більш ніж 300 кН «п'ять-чвертьхвильовий» режим забезпечує набагато кращу проникаючу здатність установки, ніж «три-чвертьхвильовий», нібито «зберігаючи» головну перевагу чвертьхвильового резонансного режиму – здатність успішно долати великі лобові опори ґрунту [1, 3].

На практиці доцільно чергувати ці два режими, переходячи в залежності від ґрунтових умов з одного режиму на інший за рахунок змінення частоти вібрації, достатньо точно визначеної [1], що дозволить не тільки покращити проникаючу здатність установок, що розробляються для прокладання труб довжиною 100...200 м і більше, а і енергетичні показники процесу. Наприклад, працюючи в «три-чвертьхвильовому» режимі (з меншими частотами та витратами потужності), при проходженні щільних ґрунтів перейти в «п'ять-чвертьхвильовий» режим тощо.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та випробуваннях нових звукорезонансних установок для вібропроколу.

Висновки. 1. При прокладанні труб довжиною 100...200 м способом вібропроколу непарно кратні чвертьхвильовому резонансні режими – «три-чвертьхвильовий» і «п'ять-чвертьхвильовий» – забезпечують практично прийнятні показники проходки.

2. У ґрунтах малої та середньої щільності перевагу має «три-чвертьхвильовий» режим, що забезпечує достатньо високу та стабільну швидкість проходки по всій довжині свердловини (100...200 м).

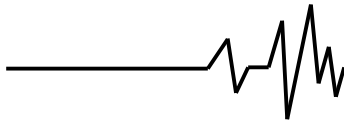
3. У щільних ґрунтах перевага надається «п'ять-чвертьхвильовому» резонансному режиму, який забезпечує успішне подолання лобових опорів ґрунту в широкому діапазоні їх значень.

4. На практиці доцільно комплексне використання непарно кратних резонансних режимів, тобто перехід у процесі вібропроколу з одного режиму на інший в залежності від змінення ґрунтових умов.

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. Кірієнко О.А. Порівняльний аналіз вібраційних способів проколу ґрунтів при безтраншейному прокладанні трубопроводів. – ВНТЖ «Вібрації в техніці та технологіях». 2015, №2(78). с. 87-91.

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

5. Исследования вибрационного и виброударного погружения свай. Тр. ВНИИТС, вып. 71. М., «Транспорт». 1968.

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

Список джерел в транслітерації

1. Kiriienko 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. Kiriienko 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. Kiriienko O.A. Porivnyal'nyy analiz vibratsiynykh sposobiv prokolu gruntiv pry beztransheynomu prokladanni truboprovodiv. – VNTZH “Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh”. 2015, №2(78). s. 87-91.

4. Deyvis R.M. Volnyi napryazheniy v tverdyih telan. – М., ИЛ, 1961. – 103 с.

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

6. Kershenbaum N.YA., Minayev V.I. Vibrometod v prokходке gorizontalnykh skvazhin. М., «Nedra». 1968. – 152 с.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТНО КРАТНЫХ ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВОМУ ЗВУКОРЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМОВ ПРИ БЕСТРАНШЕЙНОЙ ПРОКЛАДКЕ ДЛИННЫХ ТРУБ СПОСОБОМ ВИБРОПРОКОЛА

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы применения нечетно кратных четвертьволновому звукорезонансных режимов работы установок для вибропрокола при бестраншейной прокладке трубопроводов длиной 100...200 м. Данная статья продолжает цикл статей, посвященных исследованию звукорезонансных режимов работы установок для вибропрокола с целью повышения их производительности за счет повышения скорости проходки, проникающей способности, возможности преодоления больших лобовых сопротивлений грунта при приемлемой энергоёмкости процесса. Исследования выполнены на основе волновой

теории распространения напряжений в погружаемой трубе и грунте. Рассмотрены особенности работы в «три-четвертьволновом» и «пять-четвертьволновом» резонансных режимах при прокладке труб диаметром 529 мм длиной 100, 150 и 200 м. Проанализированы зависимости средней скорости погружения трубы и потребляемой мощности от величины лобового и бокового сопротивлений грунта, глубины проходки, амплитуды возмущающей силы вибратора. Проведено сравнение по эффективности и энергоёмкости «три-четвертьволнового» и «пять-четвертьволнового» резонансных режимов, даны рекомендации по их реализации.

Ключевые слова: вибропрокол, нечетно кратные четвертьволновому резонансные режимы, «три-четвертьволновой» и «пять-четвертьволновой» резонансные режимы, бестраншейная прокладка трубопроводов.

APPLICATION OF ODD MULTIPLE OF QUARTER WAVE RESONANCE MODES FOR TRENCHLESS LAYING LONG PIPES BY THE METHOD OF VIBRATION PUNCTURE

Annotation. Questions of application of odd-multiple of quarter wave resonance mode operation conditions of a unit for vibration puncture during trenchless laying of pipelines with length 100...200 meters are considered. This article continues the series of works, which are devoted to studies of wave resonance modes of operation conditions of a unit 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. Specifics of operating in “three-quarter” and “five-quarter” wave resonance modes during laying of pipes with diameter 529 mm and lengths 100, 150 and 200 meters are considered. Dependencies of mean velocity of immersing pipe and power consumption from frontal and side resistances values of soil, depth of immersion, amplitude of vibrator disturbing force have been analyzed. Comparison of effectiveness and energy capacity criteria's of “three-quarter” and “five-quarter” wave resonance modes has been performed, recommendations about their implementation are given.

Key words: vibration puncture, odd multiple of quarter wave resonance modes, “three-quarter” and “five-quarter” wave resonance modes, trenchless laying of pipelines.