

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІБРОПРОДАВЛЮВАННЯ ДОВГОМІРНИХ ТРУБ У ЗВУКОРЕЗОНАНСНИХ РЕЖИМАХ

У даній статті розглядаються особливості безтраншейного прокладання труб діаметром 1400 мм довжиною 100...300 м способом вібропродавлювання в звукорезонансних режимах - «три-чвертьхвильовому» та «п'ять-чвертьхвильовому». 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. Отримані теоретичні результати дослідження процесу вібропродавлювання довгомірних труб діаметром 1400 мм можуть бути використані при проектуванні та випробуваннях нових звукорезонансних установок.

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

Вступ. У роботі [1] розглядалися особливості безтраншейного прокладання труб діаметром до 529 мм довжиною 100...200 м способом вібропроколу в звукорезонансних режимах. Труби такої довжини найчастіше доводиться прокладати при подоланні різноманітних водних перешкод – озер, річок, водойм, що, як правило, здійснюється під дном водойма. Була показана ефективність застосування при великих лобових опорах ґрунту непарно кратних чвертьхвильовому резонансних режимів [2], «три-чвертьхвильового» та «п'ять-чвертьхвильового», які дають можливість значно збільшити продуктивність та проникаючу здатність установок для проколу при прийнятній енергоємності процесу.

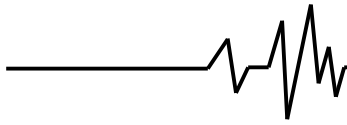
При прокладанні труб діаметром до 1400 мм способом вібропродавлювання внаслідок постійного примусового видалення ґрунтового ядра з порожнини труби [4] лобовий опір можна вважати сталим і таким, що підтримується на постійному рівні; переважний же вплив на процес проходки в такому випадку має боковий опір ґрунту, який

збільшується пропорційно глибині проникання труби в ґрунт.

У зв'язку з вищенаведеним є необхідність дослідити ефективність та особливості роботи установок для вібропродавлювання труб таких параметрів у звукорезонансних режимах – «три-чвертьхвильовому» та «п'ять-чвертьхвильовому» - задля підвищення їх продуктивності та проникаючої здатності.

Мета даної роботи – визначити ефективність застосування та особливості роботи установок для вібропродавлювання в «три-чвертьхвильовому» та «п'ять-чвертьхвильовому» резонансних режимах при прокладанні труб діаметром 1400 мм довжиною 100...300 м при широкій варіації параметрів вібрації та ґрунту, взятих у реальних межах [5]. Таке дослідження процесу вібропродавлювання довгомірних труб у звукорезонансних режимах проводиться вперше. Модель та методика розрахунку непарно кратних чвертьхвильовому резонансних режимів, на які налаштовується вібратор, аналогічні викладеним у роботі [2].

Основна частина. На рис. 1 наведені залежності середньої швидкості заглиблення



труби $V_{сер}$ і споживаної потужності P від глибини проходки для труби довжиною 100 м. Ці залежності отримані при наступних параметрах процесу: зовнішній діаметр труби 1400 мм, лобовий опір ґрунту в зоні пластичних деформацій 10 кН, зона пружності по лобовій поверхні 0,5 см, сухе тертя ґрунту по боковій

поверхні 6 кН/м, зона пружності по боковій поверхні 0,2 см, коефіцієнт пружної жорсткості ґрунту 1000 кН/м, резонансні частоти для труби довжиною 100 м із приєднаною масою вібратора [2] 2000 кг складали відповідно 35 Гц (криві 1, 1') і 58 Гц (криві 2).

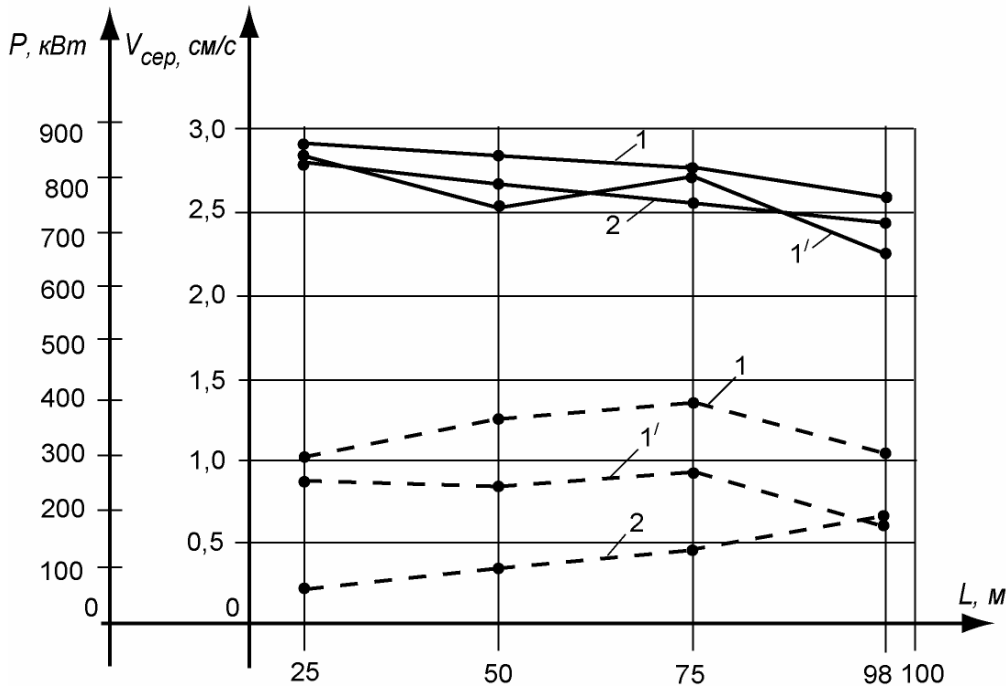


Рис. 1. Залежності середньої швидкості заглиблення труби (—) і споживаної потужності (----) від глибини проходки для труби довжиною 100 м у «три-чвертьхвильовому» (1, 1') і «п'ять-чвертьхвильовому» (2) режимах.

Амплітуда збурювальної сили $F_0 = 500$ (1'), 600 (1) і 800 кН (2)

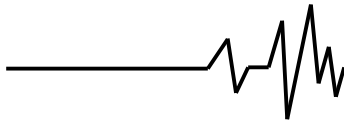
Більше значення амплітуди збурювальної сили вібратора F_0 для «п'ять-чвертьхвильового» режиму порівняно з «три-чвертьхвильовим» пояснюється значно меншими амплітудами коливань самої труби в першому випадку. Межі змінювання глибини заглиблення вибрані від 25 м (початкова ділянка не становить особливих труднощів) до 98 м, коли мають місце і лобовий, і боковий опір ґрунту.

Із рис. 1 видно, що швидкість $V_{сер}$ в обох випадках мають приблизно однаковий характер змінювання із збільшенням глибини проходки. У «три-чвертьхвильовому» режимі швидкість $V_{сер}$ складає 2,6-2,9 см/с, тобто дещо більше ніж у «п'ять-чвертьхвильовому» (на 9,7%), і це незважаючи на меншу амплітуду збурювальної сили вібратора F_0 . Однак потужність P у «три-чвертьхвильовому» режимі значно більше,

ніж у «п'ять-чвертьхвильовому» (майже в 4 рази). Зниження амплітуди F_0 у «три-чвертьхвильовому» режимі до 500 кН (крива 1'), тобто на 16,7%, призводить до деякого зниження як швидкості $V_{сер}$, так і потужності

P , однак витрати енергії залишаються все ще високими (вище, ніж у «п'ять-чвертьхвильовому» режимі у середньому в 2-3 рази).

Таким чином, при вібропродавлюванні труб довжиною 100 м «п'ять-чвертьхвильовий» режим забезпечує дещо кращі показники проходки, ніж «три-чвертьхвильовий». Так, навіть при менших значеннях амплітуди збурювальної сили вібратора F_0 (на 25-37%) енергоємність процесу в «три-чвертьхвильовому» режимі вище, ніж у «п'ять-чвертьхвильовому» в середньому в 2,5 рази. Отже, «три-чвертьхвильовий» режим



невигідний з енергетичної точки зору, незважаючи на дещо більшу швидкість проходки.

На рис. 2 наведені залежності середньої швидкості заглиблення труби $V_{сер}$ і споживаної потужності P від глибини проходки для труби довжиною 150 м. Резонансні частоти складають для «три-чвертьхвильового» режиму 24,5 Гц, для «п'ять-чвертьхвильового» - 40 Гц, амплітуда збурювальної сили вібратора F_0 в обох випадках приймалася 800-1000 кН, решта параметрів – як у попередньому випадку. Із рис. 2 видно, що в «три-чвертьхвильовому» режимі швидкість $V_{сер}$ достатньо стабільна на більшій частині проходки і складає в

середньому 2,85 см/с (102,6 м/год), однак на останній ділянці (після відмітки 125 м) швидкість $V_{сер}$ різко падає, і проходка може повністю припинитися. Із збільшенням амплітуди F_0 до 1000 кН (крива швидкості 1') проходка відновлюється і з високою швидкістю (наприкінці проходки $V_{сер} = 2,86$ см/с) завершується на проектній довжині. Споживана потужність P при $F_0 = 800$ кН складає в середньому близько 500 кВт, а із збільшенням F_0 до 1000 кН різко зростає і наприкінці проходки складає 732 кВт.

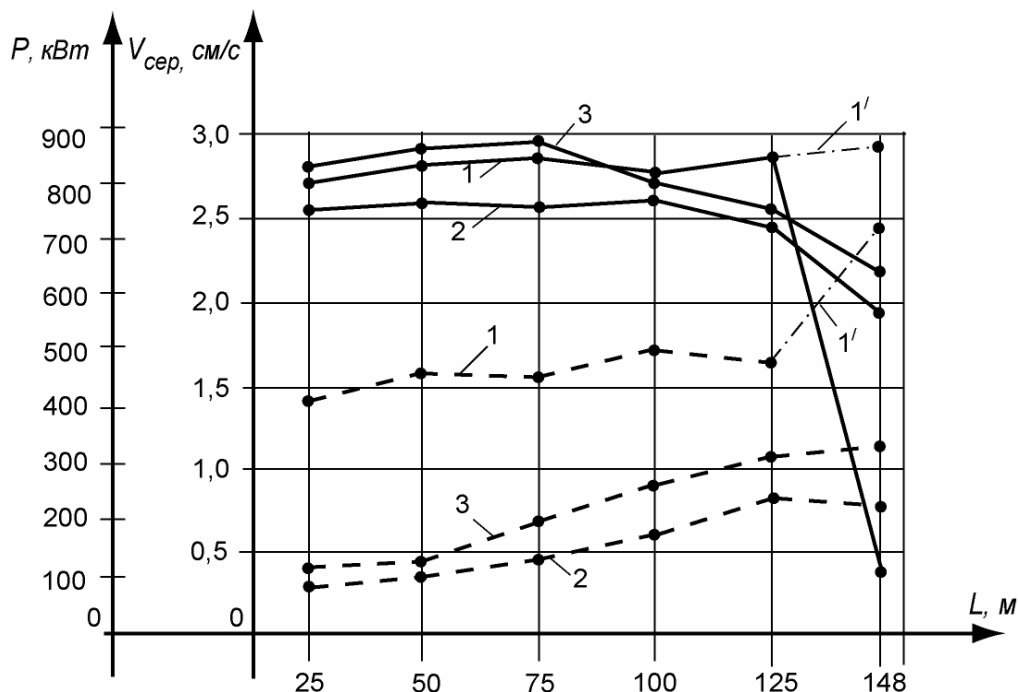
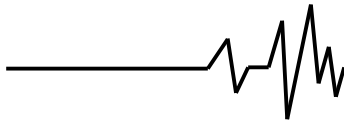


Рис. 2. Залежності середньої швидкості заглиблення труби (—) і споживаної потужності (----) від глибини проходки для труби довжиною 150 м у «три-чвертьхвильовому» (1, 1') і «п'ять-чвертьхвильовому» (2, 3) режимах.

Амплітуда збурювальної сили $F_0 = 800$ (1, 2) і 1000 кН (1', 3)

У «п'ять-чвертьхвильовому» режимі (крива 2) при $F_0 = 800$ кН швидкість $V_{сер}$ на більшій ділянці проходки майже стабільна і складає біля 2,55 см/с (91,8 м/год), а на останній частині шляху (після відмітки 125 м) швидкість дещо знижується і складає на відмітці 148 м - 1,86 см/с (67 м/год), тобто залишається цілком придатною. При амплітуді збурювальної сили $F_0 = 1000$ кН (крива 3)

швидкість $V_{сер}$ дещо зростає у середині проходки (2,9 см/с), а у другій частині шляху починає знижуватися; проходка завершується на проектній довжині з достатньо високою швидкістю – 2,18 см/с (78,5 м/год). Порівнюючи криві 2 і 3 бачимо, що зниження амплітуди F_0 на 20% (з 1000 до 800 кН) призводить до зниження швидкості на 4-13%, а потужності на 26-30%, що суттєво. Отже, вибір із двох



значень F_0 меншого (800 кН) є енергетично виправданим без значних утрат у швидкості проходки. При порівнянні показників проходки (швидкість і споживана потужність) у «три-чвертьхвильовому» і «п'ять-чвертьхвильовому» режимах бачимо, що при рівних амплітудах збурювальної сили F_0 (наприклад, 800 кН) швидкість $V_{сер}$ у «три-чвертьхвильовому» режимі хоч і дещо вище (на 12%), тим не менш різко падає після відмітки 125 м, і проходка може припинитися. Споживана потужність P у цьому режимі більш ніж потужність у «п'ять-чвертьхвильовому» режимі в 3,7 рази. При $F_0 = 1000$ кН проходка відновлюється з високою швидкістю (2,86 см/с), однак потужність P складає наприкінці проходки 732 кВт, тобто перевищує потужність у «п'ять-чвертьхвильовому» режимі в 2,4 рази.

Таким чином, при вібропродавлюванні труб довжиною 150 м більш ефективним за швидкістю та придатним за енергоємністю є «п'ять-чвертьхвильовий» режим, який забезпечує успішне подолання проектною довжини проходки.

При прокладанні труб довжиною 200 м резонансні частоти «три-чвертьхвильового» та «п'ять-чвертьхвильового» режимів складають відповідно 17 і 30 Гц. Незважаючи на те, що була показана неефективність «три-чвертьхвильового» режиму при прокладанні труб довжиною 150 м, розглянемо цей режим при прокладанні труб довжиною 200 м (для остаточного вирішення питання про його придатність).

На рис. 3 наведені залежності середньої швидкості $V_{сер}$ і споживаної потужності P від глибини проходки для труби довжиною 200 м. Амплітуда збурювальної сили вібратора F_0 прийнята для «три-чвертьхвильового» режиму 600 кН, а для «п'ять-чвертьхвильового» - 1000 кН. Менша величина F_0 для «три-чвертьхвильового» режиму пов'язана з тим, що амплітуда коливань самої труби в цьому режимі досить велика (близько 16-17 мм при $F_0 = 600$ кН), а завищення F_0 може призвести до несталості процесу; в той же час амплітуда коливань труби в «п'ять-чвертьхвильовому» режимі не перевищує 4-5 мм (при $F_0 = 1000$ кН).

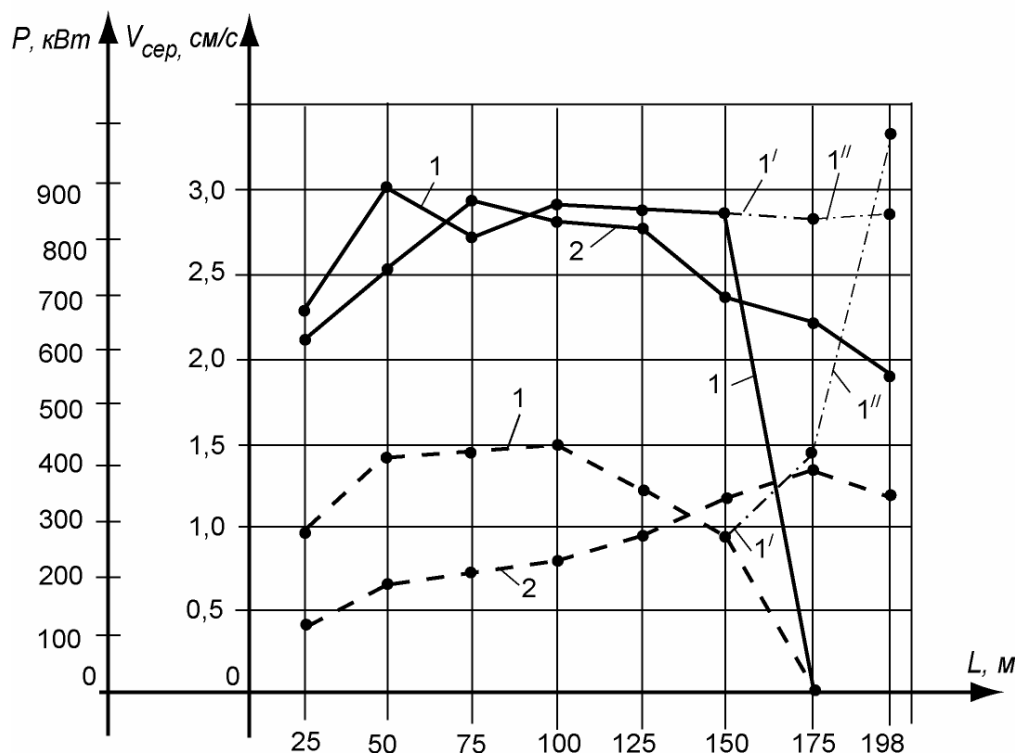
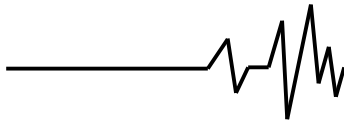


Рис. 3. Залежності середньої швидкості заглиблення труби (—) і споживаної потужності (----) від глибини проходки для труби довжиною 200 м у «три-чвертьхвильовому» (1, 1', 1'') і «п'ять-чвертьхвильовому» (2) режимах.

Амплітуда збурювальної сили $F_0 = 600$ (1), 800 (1') і 1000 кН (1'', 2)



Про важливість раціонального вибору амплітуди збурювальної сили вібратора в звукорезонансних режимах йшлося в роботі [1].

Із рис. 3 видно, що характер змінювання швидкості $V_{сер}$ в «три-чвертьхвильовому» режимі загалом аналогічний характеру $V_{сер}$ при прокладанні труби довжиною 150 м, хоча коливання швидкості по довжині проходки в даному випадку більш суттєві. Після відмітки 150 м швидкість $V_{сер}$ різко знижується до нуля, і процес проходки повністю припиняється. Для успішного завершення процесу проходки необхідно збільшити збурювальну силу F_0 , причому це доводиться робити 2 рази: при $F_0 = 800$ кН труба заглиблюється до відмітки 175 м зі швидкістю 2,75 см/с (крива 1'), а потім падає до нуля (на рис. не показано), що змушує збільшити F_0 до 1000 кН (крива 1''). Проходка при цьому відновлюється і завершується на проектній глибині 200 м зі швидкістю 2,79 см/с (100,4 м/год). Однак споживана потужність P відповідно значно зростає і складає наприкінці проходки (при $F_0 = 1000$ кН) 931,6 кВт. Як бачимо, і при прокладанні труби довжиною 200 м «три-чвертьхвильовий» режим не виявився ефективним: не забезпечує достатню проникаючу здатність установки та потребує занадто великих витрат потужності. При роботі в «п'ять-чвертьхвильовому» режимі швидкість $V_{сер}$ хоча і змінюється доволі різко по довжині проходки, але наприкінці її складає достатньо придатну величину – 1,91 см/с (68 м/год). Споживана потужність P в цьому режимі зростає наприкінці проходки до 365 кВт, енергоємність процесу при прокладанні труб такої величезної довжини можна вважати придатною. У порівнянні з «три-чвертьхвильовим» режимом витрати енергії при рівних амплітудах збурювальної сили вібратора $F_0 = 1000$ кН у даному випадку менш у 2,55 рази.

Таким чином, і при прокладанні труб довжиною 200 м перевагу слід надати «п'ять-чвертьхвильовому» резонансному режиму як більш енергетично вигідному та такому, що забезпечує високу проникаючу здатність установки для вібропродавлювання.

Дослідження процесу вібропродавлювання в «п'ять-чвертьхвильовому» резонансному режимі труб довжиною 300 м (резонансна частота 20 Гц)

показало, що при амплітуді збурювальної сили вібратора $F_0 = 1000$ кН швидкість $V_{сер}$ різко змінюється по довжині проходки, падаючи до нуля після відмітки 175 м. Подальше проходження свердловини можливо лише за умови збільшення амплітуди збурювальної сили F_0 до 1200 кН, причому на відмітці 175 м при збільшенні F_0 на 16,7 % (з 1000 до 1200 кН) потужність P зростає на 35% (з 319,6 до 432,5 кВт). Максимальна потужність при прокладанні труб довжиною 300 м у «п'ять-чвертьхвильовому» режимі складає 632 кВт. Такі витрати енергії можуть бути виправдані тільки надзвичайної складністю задачі.

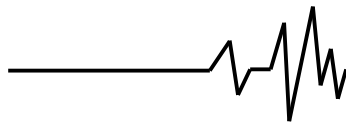
Отримані теоретичні результати дослідження процесу вібропродавлювання довгомірних труб діаметром 1400 мм можуть бути використані при проектуванні та випробуваннях нових звукорезонансних установок.

Висновки

1. При прокладанні труб довжиною 100-300 м діаметром 1400 мм способом вібропродавлювання найкращі показники проходки (швидкість заглиблення та споживана потужність) забезпечує «п'ять-чвертьхвильовий» резонансний режим.
2. Максимальна довжина труби, що прокладається способом вібропродавлювання в «п'ять-чвертьхвильовому» резонансному режимі, становить 300 м.
3. Основною причиною великих витрат потужності при прокладанні труб довжиною до 300 м у звукорезонансних режимах і головною перешкодою в прокладанні більш довгомірних труб є великий боковий опір ґрунту, що зростає пропорційно глибині проходки.

Список використаних джерел

1. Кірієнко О.А. Застосування непарно кратних чвертьхвильовому звукорезонансних режимів при безтраншейному прокладанні довгомірних труб способом вібропроколу. – ВІТЖ «Вібрації в техніці та технологіях». 2016, №1(81). с. 30-35.
2. Кірієнко О.А. Застосування звукорезонансних режимів роботи при безтраншейному прокладанні труб методом вібропроколу. – ВІТЖ «Вібрації в техніці та технологіях». 2011, №2(62). с. 72-77.
3. Дейвис Р.М. Волны напряжений в твердых телах. М., ИЛ, 1961. – 103 с.



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

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

Список джерел в транслітерації

1. Kiriienko O.A. Zastosuvannia neparno kratnykh chvertkhvylovomu zvukorezonansnykh rezhymiv pry beztransheinomu prokladanni dovhomirnykh trub sposobom vibroprokolu. – VNTZh «Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh». 2016, №1(81). s. 30-35.

2. Kiriienko O.A. Zastosuvannia zvukorezonansnykh rezhymiv roboty pry beztransheinomu prokladanni trub metodom vibroprokolu. – VNTZh «Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh». 2011, №2(62). s. 72-77.

3. Deivys R.M. Volnyi napriazheni v tverdykh telakh. М., YL, 1961. – 103 с.

4. Kershenbaum N.YA., Minayev V.I. Vibrometod v prokhodke gorizontalnykh skvazhin. М., «Недра». 1968. – 152 с.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВИБРОПРОДАВЛИВАНИЯ ДЛИННЫХ ТРУБ В ЗВУКОРЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМАХ

Аннотация. В данной статье рассматриваются особенности бестраншейной прокладки труб диаметром 1400 мм длиной 100...300 м способом вибропродавливания в звукорезонансных режимах – «три-четвертьволновом» и «пять-четвертьволновом». 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. Полученные теоретические результаты исследования процесса вибропродавливания длинных труб диаметром 1400 мм могут быть использованы при проектировании и испытаниях новых звукорезонансных установок.

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

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

Annotation. In this article features of trenchless laying of pipelines with diameter 1400 mm and length 100...300 m by vibration piercing method in “three-quarter” and “five-quarter” wave resonance modes. 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. Obtained theoretical results of vibration piercing process for long-measuring pipes with diameter 1400 mm can be applied during for design and tests of a new sound-resonance units.

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