



Кірієнко О. А.

Національний технічний  
університет України  
"Київський  
політехнічний  
інститут"

УДК 624.132.334

## ЗАСТОСУВАННЯ ЗВУКОРЕЗОНАНСНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ПРИ БЕЗТРАНШЕЙНОМУ ПРОКЛАДАННІ ТРУБ МЕТОДОМ ВІБРОПРОКОЛУ

*Показаны преимущества и недостатки бестраншейной прокладки трубопроводов вибрационными методами. Проведено моделирование процесса вибропрокола при бестраншейной прокладке трубопроводов на основе волновой теории. Показаны особенности и преимущества работы установки для вибропрокола в четвертьволновом резонансном режиме.*

*The advantages and imperfections of pipe driving by vibration methods are shown. The process modeling of vibration puncture for pipe driving based on a wave theory is realized. The features and advantages of operation of apparatus for vibration puncture in quarter-wave resonance mode are shown.*

При будівництві трубопроводів різного призначення найбільш трудомісткою операцією є спорудження переходів через залізничні насипи, автомобільні шляхи, проїжджі частини міських вулиць та інші природні та штучні перешкоди.

Найбільш раціональним, а іноді, єдино можливим способом спорудження переходів на таких ділянках є бестраншейна прокладка трубопроводів, що дозволяє зберегти нормальну роботу транспорту та полотна дороги.

На сьогоднішній день у передовій закордонній практиці 95% обсягу робіт із прокладання та реконструкції підземних трубопроводів здійснюється бестраншейними методами; у деяких великих закордонних містах прокладання інженерних комунікацій відкритим способом взагалі заборонено [1,2].

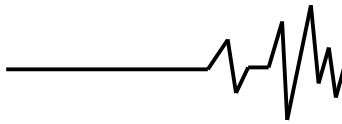
Труби діаметром до 600 мм прокладаються способом проколу без видалення ґрунту, що витискається.

Поширення набули вібраційні способи проколу: вібропрокол, віброударний і віброударно-втискаючий проколи. Вібраційні способи проколу відрізняють такі важливі переваги, як порівняно висока швидкість проходки (у 6-8 разів більш ніж при статичному проколі), відсутність потужних домкратів, невеликий обсяг підготовчо-завершальних робіт, висока безпека при проведенні робіт,

можливість прокладання труб, заздалегідь зварених на всю довжину переходу (до 50 м, а у разі прокладання під дном водоймищ - й набагато більше), що дозволяє вести процес безперервно та суттєво зменшує вірогідність скривлення труби. [3]. Ці переваги вібраційних способів проколу набувають особливого значення при розв'язанні стратегічних задач будівництва або модернізації газотранспортної системи нашої країни.

Однак, незважаючи на вказані переваги способу вібропроколу, можливості його обмежуються (як й інших способів проколу) складністю подолання великих лобових опорів ґрунту, що виникають, зокрема, при зустрічі забойного кінця труби з твердими включеннями в ґрунті (камінням, шматками шпал тощо, наприклад при перетині залізничних насипів).

У розповсюдженій до нашого часу практиці вібропроколу на низьких частотах вібрації (коли довжина хвилі напружень, що виникає в трубі, у багато разів перевищує її довжину, і труба розглядається як абсолютно жорсткий стрижень), задача успішного подолання твердих включень ще не розв'язана. У більшості випадків здійснити прокладку труби при її зустрічі з твердими ґрунтовими включеннями не вдається. Це знижує продуктивність установок, призводить до додаткових витрат часу на добування труби зі свердловини та новий прокол.



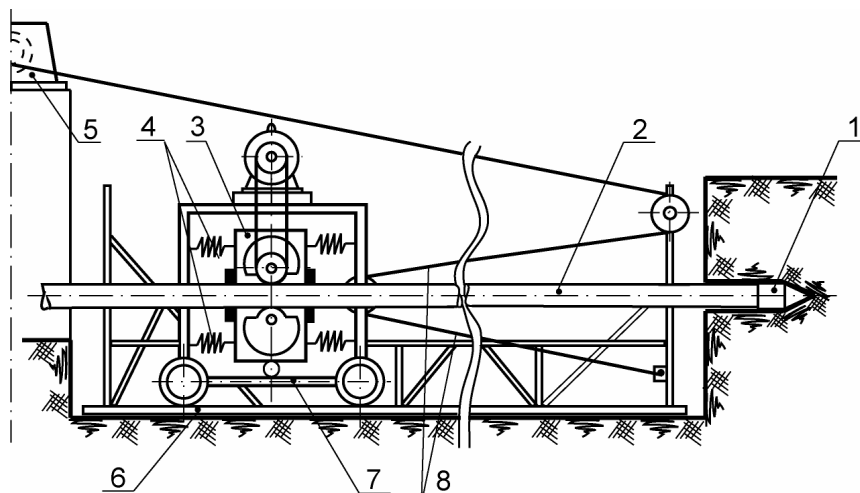
За кордоном, зокрема, в США та Великій Британії, успішно застосовують високочастотні резонансні вібратори, робота яких ґрунтується на застосуванні поздовжнього пружного резонансу стволу елемента, що заглиблюється (при цьому довжина хвилі напружень в елементі сумірна з його довжиною, і на інтенсивність заглиблювання суттєво впливають хвильові процеси в самому елементі та ґрунті). За повідомленнями фірм, що застосовують такі вібратори, швидкість заглиблювання елементів у ґрунт зростає в 10-20 разів, також зростає глибина заглиблювання, та з'являється можливість роботи в складних ґрунтових умовах [4,5,6].

У нашій країні при заглиблюванні елементів у ґрунт застосовуються традиційні ще для радянської школи вібротехніки низькочастотні вібратори, що розраховані на роботу при частоті вібрації до 25 Гц.

Застосування високо-частотних (звукорезонансних) режимів при вібропроколі ґрунтів може значно інтенсифікувати процес проколу як з точки зору підвищення швидкості проходження свердловини (а значить, і продуктивності), так і успішного подолання великих лобових опорів ґрунту, зокрема, твердих ґрунтових включень.

Мета даної статті - показати можливості звукорезонансних режимів роботи установок для вібропроколу, що підвищують їх продуктивність (за рахунок збільшення швидкості проходки) та проникаючу здатність в різних ґрунтах, у тому числі з твердими включеннями, при прийнятній енергоємності процесу. Принципова схема установки для вібропроколу показана на рис. 1 [3].

Напірне зусилля в такій установці здійснюється за допомогою тросів та лебідок, не є сталим і залежить від швидкості заглиблювання труби в ґрунт.



**Рис. 1. Принципова схема установки для вібропроколу**  
**1 – конусний наконечник; 2 – труба, що заглиблюється; 3 – дебалансний вібратор спрямованої дії; 4 – система пружин; 5 – лебідки; 6 – напрямна рама; 7 – візок вібратора; 8 – система тросів**

При роботі в звукорезонансних режимах трубу, що заглиблюється, необхідно розглядати як пружний стрижень, і для математичного опису процесу вібропроколу необхідно застосувати відоме з класичної механіки хвильове рівняння для пружного стрижня з урахуванням внутрішніх утрат [7], яке доповнено зовнішніми силами, що діють на трубу (збурювальна сила вібратора, опори ґрунту по боковій та лобовій поверхням труби). Унаслідок значної нелінійності характеристик ґрунту таке хвильове рівняння не може бути розв'язане аналітично. Тому для отримання приблизного розв'язання доцільно подати цей процес системою з розподіленими параметрами (рис. 2).

Труба, що заглиблюється, подається у вигляді елементів із зосередженою масою, з'єднаних пружинами та демпферами, які моделюють внутрішню пружність та в'язкість труби. ґрунт здійснює пружно-в'язко-пластичний опір заглиблюванню по боковій поверхні труби та пружно-пластичний – по лобовій.

Формально таке подання процесу еквівалентно заміні диференціального рівняння другого порядку в частинних похідних із нелінійними граничними умовами системою звичайних нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку [8], доповнених рівнянням для нульового елемента (1).

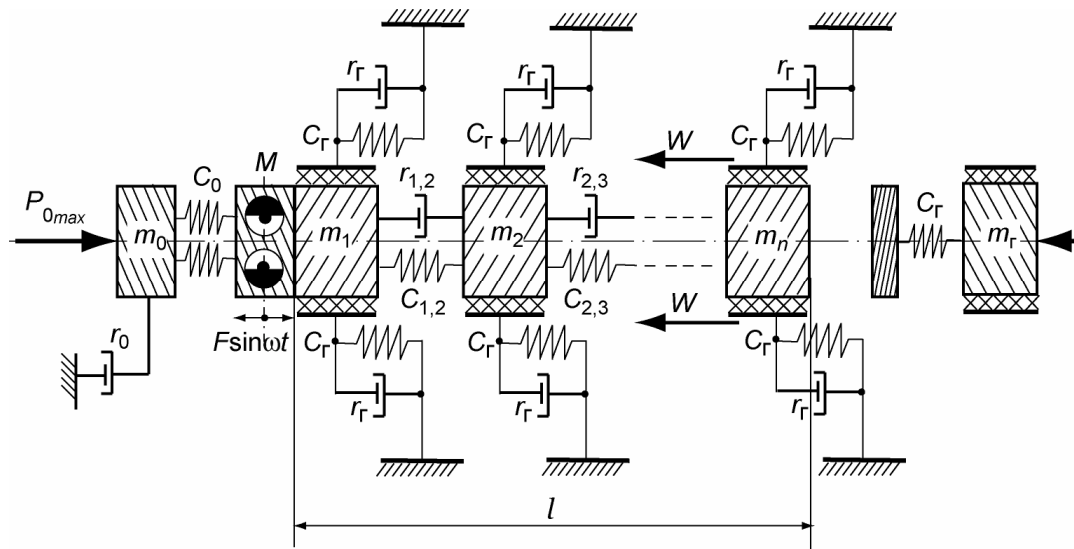
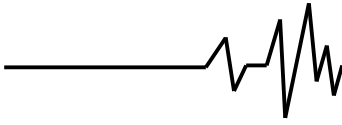


Рис. 2. Механічна модель процесу вібропроколу

$m_1, m_2 \dots m_n, m_r$  - елементарні маси труби і ґрунтової пробки;  $m_0$  - маса візка;  $M$  - маса неїдресорної частини вібратора;  $C_{1,2}, C_{2,3} \dots C_n$  - пружності труби та ґрунту;  $C_0$  - жорсткість пружин напірного механізму;  $r_{1,2}, r_{2,3} \dots r_n$  - в'язкі опори труби та ґрунту;  $r_0$  - в'язке тертя в напірному механізмі;  $Q$  - сила лобового опору ґрунту;  $W$  - сила сухого тертя ґрунту;  $F \sin \omega t$  - періодична збудовальна сила вібратора;  $P_0$  - напірне зусилля лебідок;  $l$  - довжина труби

$$\begin{aligned}
 m_0 \ddot{x}_0 &= P_0 - \underbrace{C_0(x_0 - x_1 + \delta_{0,1})}_{F_2} - r_0 \dot{x}_0; \\
 (m_1 + M) \ddot{x}_1 &= F_2 + F \sin \omega t - C_{1,2}(x_1 - x_2 + \delta_{1,2}) - r_{1,2}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - S_1; \\
 m_2 \ddot{x}_2 &= -C_{2,1}(x_2 - x_1 + \delta_{2,1}) - C_{2,3}(x_2 - x_3 + \delta_{2,3}) - r_{2,1}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - \\
 &\quad - r_{2,3}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - S_2; \\
 &\dots \\
 m_i \ddot{x}_i &= -C_{i,i-1}(x_i - x_{i-1} + \delta_{i,i-1}) - C_{i,i+1}(x_i - x_{i+1} + \delta_{i,i+1}) - \\
 &\quad - r_{i,i-1}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) - r_{i,i+1}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1}) - S_i; \\
 &\dots \\
 m_n \ddot{x}_n &= -C_{n,n-1}(x_n - x_{n-1} + \delta_{n,n-1}) - r_{n,n-1}(\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) - S_n - Q,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$



де  $m_i$  - зосереджена маса  $i$  - тої ділянки труби;

$x_i, \dot{x}_i, \ddot{x}_i$  - відповідно переміщення, швидкість та прискорення  $i$  - тої ділянки труби відносно ґрунту;

$C_{i,i-1}$  - жорсткість ділянки труби між масами  $m_i$  і  $m_{i-1}$ ;

$r_{i,i-1}$  - коефіцієнт в'язкого тертя між ділянками труби  $i$  та  $i-1$ ;

$\delta_{i,i-1}$  - початкова відстань між ділянками труби  $i$  та  $i-1$ ;

$S_i$  - повний опір ґрунту по боковій поверхні труби на  $i$  - тій ділянці;

$Q$  - опір ґрунту по лобовій поверхні труби;

$C_0$  - жорсткість пружин напірного механізму;

$r_0$  - коефіцієнт в'язкого тертя напірного механізму;

$P_0$  - напірне зусилля лебідок;

$M$  - маса невіднесеної частини вібратора;

$m_0$  - маса візка;

$F$  - амплітуда збурювальної сили вібратора;

$\omega$  - кутова частота вимушених коливань.

Математичний вираз для бокового та лобового опору ґрунту був отриманий на підставі досліджень характеру розповсюдження в ньому поперечних хвиль, що виникають при вібраційному заглибленні елементів (паль, труб тощо), наведених в [9].

У даній моделі враховані наступні особливості роботи установки. Як було сказано, напірне зусилля утворюється за допомогою системи тросів і лебідок, не є сталим, а залежить від швидкості заглиблювання труби в ґрунт. Вібратору та трубі зусилля передається через систему пружин, щоб інтенсивність вібрації під дією цього зусилля не порушувалась. У механічній моделі (рис. 2) ця особливість моделюється за допомогою пружини  $C_0$ , а також демпфера  $r_0$ , що дає можливість відтворити на моделі характеристику, що "падає", залежності напірного зусилля від швидкості заглиблювання труби в ґрунт. Таким чином, наведена на рис. 2

модель достатньо повно відображує всі особливості процесу вібропроколу.

Особливості роботи в звукорезонансних режимах аналітично були досліджені автором в лінійній постановці задачі [10].

Нелінійна система рівнянь (1), що описує процес вібропроколу, розв'язувалась за алгоритмом, наведеним в [8] та доповненим із урахуванням особливостей моделі вібропроколу.

Для спрощення аналітичних досліджень процесу вібропроколу був застосований метод електромеханічних аналогій, що дозволяє за допомогою теорії довгих ліній досліджувати процес розповсюдження пружних хвиль в сталевій трубі.

Із теорії довгих ліній відомі такі особливості лінії, що дорівнює  $\frac{1}{4}$  довжини хвилі (чвертьхвильовий режим).

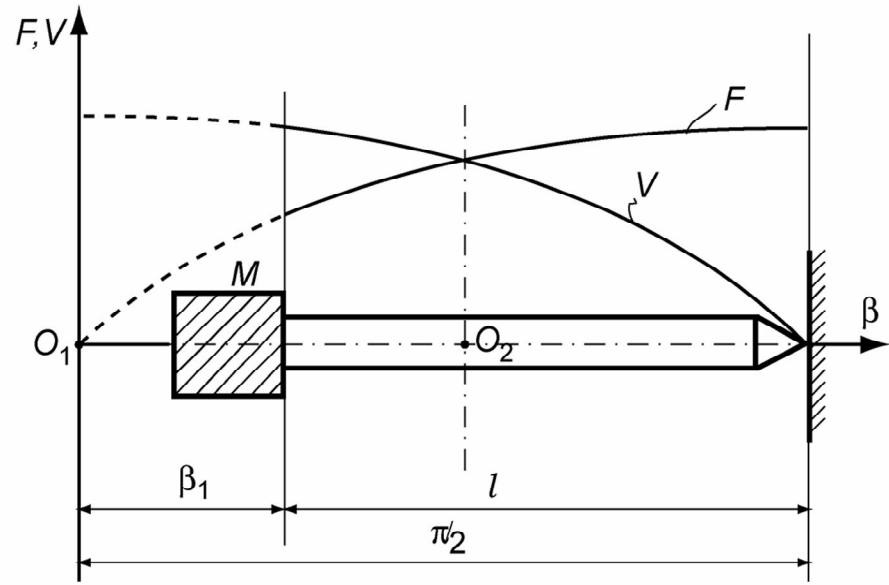
При збільшенні опору, на яке навантажена чвертьхвильова лінія, напруга (зусилля) на кінці лінії зростає, а струм (швидкість руху) падає при незмінній напрузі генератора (збурювальної сили вібратора). Отже, при роботі в режимі чвертьхвильової лінії в процесі вібропроколу з'являється цінна можливість долати великі лобові опори ґрунту, зокрема, тверді включення, без збільшення амплітуди збурювальної сили та напірного зусилля, а в ґрунтах малої та середньої щільності розв'язати велику швидкість проходки.

Вибір частот чвертьхвильового режиму (з урахуванням маси невіднесеної частини вібратора) розраховувався для моменту "стопоріння" труби о тверді включення в ґрунті (виникнення в трубі поздовжньої "стоячої" хвилі, коли на забійному кінці труби має бути "пучність" сили - рис.3) і докладно розглянутий в [10].

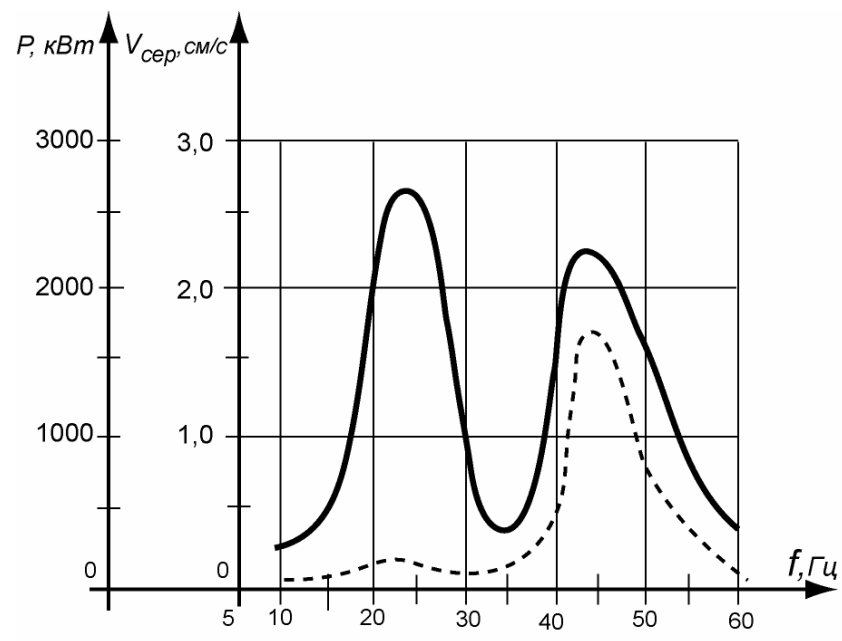
Залежності швидкості та потужності від частоти вібрації отримані за результатами досліджень, виконаних для сталеві труби діаметром 325 мм довжиною 40 м (що найчастіше зустрічається при перетині залізничних та шляхових переходів) з конусним наконечником такого ж діаметру, масою 5300 кг; маса невіднесеної частини вібратора 1600 кг.

Параметри ґрунту приймалися за літературними джерелами та змінювалися у реальних межах.

Особлива увага приділялась порівнянню двох найбільш низьких резонансних режимів – чвертьхвильового та півхвильового - з нерезонансними.



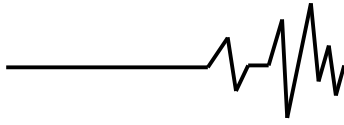
**Рис. 3. Виникнення поздовжньої “стоячої хвилі” в трубі в момент її “стопоріння” о тверді включення в ґрунті (з роботи [10])**  
 $F, V$  - сила та швидкість на забойному кінці труби;  $M$  - маса невіднесорної частини вібратора;  $l$  - довжина труби;  $\beta$  - коефіцієнт фази, що залежить від довжини хвилі  $\lambda$  і дорівнює  $2\pi/\lambda$



**Рис. 4. Графіки залежності середньої швидкості заглиблення труби (—) та споживаної потужності (-----) від частоти збудовальної сили вібратора**

На рис. 4 наведені залежності середньої швидкості заглиблення труби та споживаної потужності від частоти збудовальної сили вібратора при таких параметрах процесу вібропроколу: сила лобового опору ґрунту в

зоні пластичних деформацій 500 кН, жорсткість ґрунту по лобовій та боковій поверхням труби 1000 кН/см (поняття “жорсткість ґрунту” прийнято згідно [9]), глибина попереднього заглиблення труби 20 м, статичний момент



дебалансів вібратора 4000 кг·см, жорсткість пружин напірного механізму 100 кН/см. Причому на низьких частотах (до 20 Гц) статичний момент дебалансів вібратора приймався сталим, збурювальна сила – пропорційною квадрату частоти вібрації, а далі збурювальна сила вібратора залишалась сталою в усьому діапазоні частот вище 20 Гц.

Як бачимо з рис. 4, найбільші швидкості заглиблення труби відповідають чвертьхвильовому (частота 21,5 Гц) та півхвильовому (частота 43 Гц) режимам роботи установки. Однак максимальним швидкостям заглиблення відповідають і максимальні потужності, що споживають вібратори, особливо, у півхвильовому режимі. Така потужність не може вважатися прийнятною на практиці.

При роботі в чвертьхвильовому режимі (частота 21,5 Гц) потужність не перевищує 130 кВт, що при швидкості заглиблення труби приблизно 2,5...2,8 м/с (90...100 м/год) економічно виправдана. За такої швидкості заглиблення труба довжиною 40 м може бути прокладена за 20...25 хв. навіть у достатньо щільних ґрунтах.

Окрім того, споживана потужність вібратора може бути знижена за рахунок використання конусного наконечника дещо більшого діаметра, ніж сама труба [3].

Звукорезонансні режими потребують подальшого дослідження для розробки найкращого за швидкістю та прийнятого за енергоємністю частотного режиму роботи для всіх вібраційних способів проколу з метою інтенсифікації процесу та підвищення продуктивності установок.

### Висновки

1. Швидкість заглиблення труби в резонансних режимах (чвертьхвильовому та півхвильовому) значно вище за швидкість проходки в нерезонансних режимах.

2. При роботі установки в півхвильовому режимі витрати потужності великі, і такий режим не є економічно вигідним.

3. У чвертьхвильовому режимі швидкість заглиблення збільшується в декілька разів при прийнятній енергоємності процесу.

4. Налаштування установки для вібропроколу на роботу в чвертьхвильовому

режимі при наявності значної невіднесеної маси вібратора має здійснюватися розрахунком нової резонансної частоти [10].

5. Реалізувати чвертьхвильовий резонансний режим для стандартних труб довжиною 40...50 м можна на існуючих установках для вібропроколу з дебалансними вібраторами частотою до 25 Гц, оснащених, наприклад, дизельними двигунами потужністю до 150 кВт.

### Література

1. Бестраншейная прокладка: Преимущества перед "открытым" методом. Метод прокола. Новости рынка специальной техники и промышленного оборудования. Выпуск №118. Статья №1. <http://www.mrmz.ru/article/v118/print/1.htm>. 2009.

2. Бестраншейная прокладка труб под дорогами и другими преградами. ООО "Александрия СпецТранс". [spectrans@meta.ua](mailto:spectrans@meta.ua). 2009.

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

4. Bodine A.G. Sonic vibration generator. US patent. № 3.446.084. May.1968.

5. Bodine A.G. Sonic drilling device. US patent. № 3.684.037. August. 1972.

6. Bodine A.G. Pile driving utilizing standing wave vibrations. US patent. № 3.808.820. May.1974.

7. Дейвис Р.М. Волны напряжений в твердых телах. М., Изд-во иностранной лит-ры. 1961. – 103 с.

8. Иносов В.Л., Андреева Л.В., Вайнкоф Я.Ф. О моделировании процесса вибропогружения свай. – «Горные, строительные и дорожные машины», вып. 17, М., «Техника», 1974, с. 85-90.

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

10. Кириенко Е.А. Применение волновой теории для исследования процесса вибропрокола при бестраншейной прокладке трубопроводов. – «Известия вузов. Строительство и архитектура». 1975, № 12, с. 96-103.