

## ОЦІНКА ДІЇ ВИБУХОВОЇ ХВИЛІ НА ПРИХОПЛЕНУ ДІЛЯНКУ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ

В.М.Мойсишин, В.Д.Яцишин, В.І.Векерик

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42123,  
e-mail: math@nupg.edu.ua

*Проаналізовано розв'язок осесиметричної задачі динамічної пружності товстостінного колового циліндра методом просторових характеристик. Практичним втіленням розв'язку задачі став розрахунок напружено-деформованого стану прихопленої ділянки бурильної колони під дією вибухової хвилі на внутрішню стінку труби.*

Ключові слова: метод просторових характеристик, осесиметрична задача динамічної пружності, напружено-деформований стан товстостінного колового циліндра, прихоплена бурильна колона, ударна хвиля вибуху.

*Проанализированы результаты решения осесиметричной задачи динамической упругости толстостенного кругового цилиндра методом пространственных характеристик. Практическим воплощением решения задачи стал расчёт напряженно-деформированного состояния прихваченного участка бурильной колонны под воздействием взрывной волны на внутреннюю стенку трубы.*

Ключевые слова: метод пространственных характеристик, осесиметрическая задача динамической упругости, напряженно-деформированное состояние толстостенного кругового цилиндра, ударная волна.

*Analyzed the results of decision the axis of symmetry problem of dynamic elastic thick-walled circular cylinder method of spatial characteristics. A practical embodiment of the solution of the problem was the calculation of the stress-strain state stuck section of drill string under the influence of the blast wave on the inner wall of the tube.*

Keywords: method of spatial characteristics, the axis of symmetry problem of dynamic elasticity, stress-strain state of thick-walled circular cylinder, the shock wave.

### Актуальність задачі дослідження

Як правило, технологія ліквідації аварій та ускладнень, що виникають у процесі спорудження свердловин, передбачає послідовне застосування ряду дій і засобів або їх чергування. До таких дій, насамперед, слід віднести: розходження і повертання колони ротором, встановлення ванн, застосування простоїв імпульсної дії (ясів, вібраторів, гідрударників тощо), розгвинчування бурильної колони і витягання її частинами, обмуровання прихопленої ділянки труб, відновлення циркуляції і промивання свердловини.

Чільне місце серед цих способів займають торпедування і перфорація, що ґрунтуються на використанні енергії вибуху. В роботі [1] проаналізовано застосування протрільно-вибухової апаратури (ПВА) для ліквідації прихоплень бурильного інструменту на підприємствах Держкомгеології України за чверть століття (1973-1997 рр.). Торпеди і перфоратори використовувались на 283 із 506 розвідувальних свердловин, на яких мали місце прихоплення бурильного інструменту. Встановлено, що торпедування з метою розгвинчування різьбових з'єднань склали 78% від усіх випадків застосування енергії вибуху, торпедування з метою "струшування" бурильних труб – 18,4%, зрізування або обривання колони – 5,7%, інші випадки торпедування – 5%, перфорація з метою відновлення циркуляції промивальної рідини або подальшого встановлення ванн – 2,8%. Загальна успішність усіх випадків торпедування – 89,5%, а перфорації – 87,5%.

Зупинимось детальніше на застосуванні вибуху для "струшування" та розгвинчування труб.

Вибухове "струшування" бурильного інструменту застосовують у випадках, коли прихоплення пов'язане з "прилипанням" труб до стінки свердловин або частковим заповненням затрубного простору пухкою породою. Метод базується на використанні здатності ударних хвиль проходити, хоч і з ослабленням, крізь міцні перешкоди (у даному випадку – стінку труби) і, що не менш суттєво, викликати поступальний рух матеріалу середовища у напрямку поширення хвиль. При неоднорідній структурі середовища (а у даному випадку середовище складається з рідини і частинок породи – піску і глини) під час гальмування, що настає після проходження хвилі, частинки перерозподіляються в об'ємі, і вздовж них утворюються невеличкі порожнини, заповнені рідиною. У випадку "прилипання" утворення порожнини може "зняти" сили, що притискають труби до породи, вирівнявши тиск навколо неї, при втраті циркуляції – сприяти відновленню її, і зрештою, просто порушити зчеплення труб з породою, зменшити зусилля, необхідні для витягнення колони на денну поверхню.

Техніка "струшувань" досить проста. Після операцій розходження, промивання і перевірки прохідності труб у бурильну колону опускається заряд, який встановлюється навпроти зони прихоплення. До колони прикладають силу натягу, спрямовану на витягання труб, і крутний момент у напрямі затягування різьб з тим, щоб

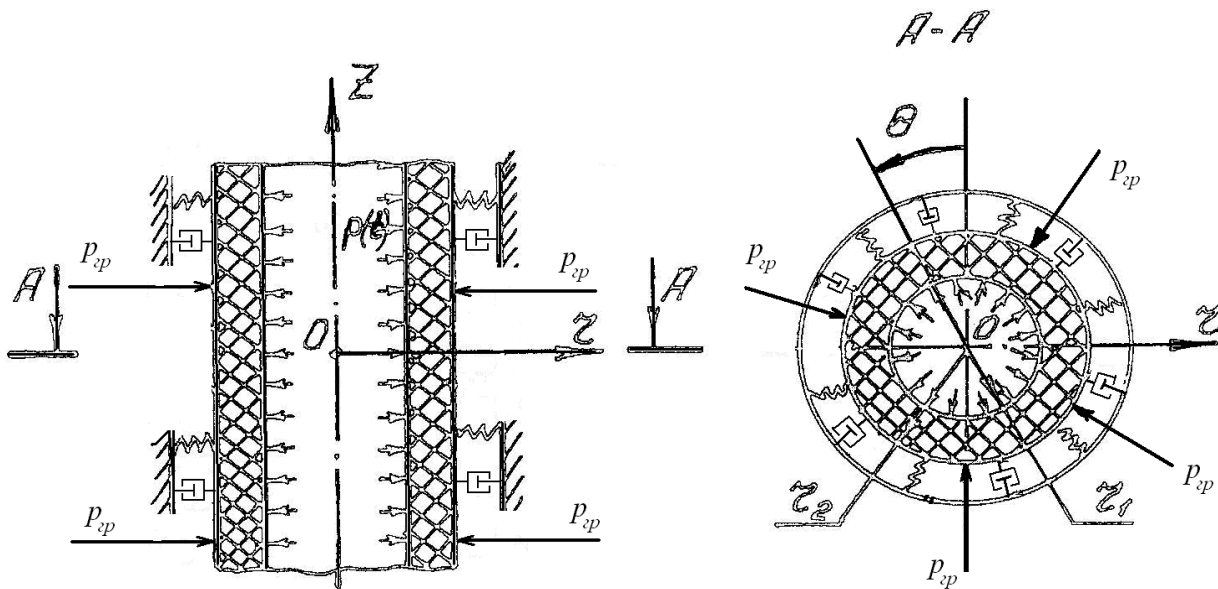


Рисунок 1 – Розрахункова схема

під час вибуху, коли труби максимально вивільнюються від утримуючих зусиль, надати їм додаткових переміщень.

Після виконання цих операцій проводять вибух. Ефективність використання торпед для ліквідації таких аварій тим більша, чим оперативніше вони застосовуються. З часом, як правило, умови ліквідації аварій ускладнюються внаслідок хімічних процесів та дії інших чинників, що сприяють зростанню сил, котрі утримують бурильний інструмент.

Техніка вибухового розгвинчування труб також складається з аналогічних операцій [2]. Після визначення місця прихоплення у свердловину на задану глибину опускають торпеду. Після цього до труб прикладають натяг і крутний момент у бік розгвинчування. Натягом розвантажують муфтове з'єднання, навпроти якого прикріплено заряд, від ваги труб, знизивши до мінімуму сили тертя в різьбі; а крутним моментом під час вибуху повертають колону. Величина натягу в першому наближенні визначається вагою верхньої частини (до місця прихоплення) колони, а крутного моменту – третіною числа обертів, які можуть бути (згідно з розрахунками) прикладені до колони даної конструкції і довжини при затягуванні різьб.

Рациональним є застосування коротких торпед (довжиною від 0,5 до 3 м), що перекривають тільки одне муфтове з'єднання, встановлених точно навпроти об'єкта роботи. Коли завдання обмежується тільки розгвинчуванням одного різьбового з'єднання, то після підривання торпеди відгвинчена частина колони витягається.

Якщо ж роботи проводяться до повної ліквідації аварій, то, не піднімаючи колону, крізь розгвинчені труби здійснюють ретельне промивання стовбура свердловини, чим усувають сили, що утримують труби вище точки відгвинчування. Після цього колону з'єднують знову. Зняття частини зусиль після промивання і по-

вторного згвинчування уможливорює проведення другого розгвинчування нижче. За сприятливих умов проведений декілька разів цикл “розгвинчування – промивання – згвинчування – розходження – і нове на більшій глибині розгвинчування” дає змогу повністю вивільнити прихоплений інструмент.

Отже, вивчення напруженого стану бурильних труб і визначення їх радіальних зміщень є актуальним завданням при проведенні вибухових робіт у свердловині з метою ліквідації прихоплень бурильної колони без руйнування елементів останньої.

### Мета і постановка задачі дослідження

Метою даного дослідження є оцінка напружено-деформованого стану (НДС) прихопленої труби в умовах, що розглядалися вище.

Затрубний матеріал, який взаємодіє з зовнішньою стінкою колони радіусом  $r_2$  (рис. 1), змодельовано силою тиску  $p_{зр}$  водонасиченого ґрунту, а також пружними і демпферувальними елементами. Силу, що діє на зовнішню стінку труби, подамо сумою трьох доданків

$$P_{зовн} = P_{зр} + P_k + P_\alpha, \quad (1)$$

де:  $P_{зр} = p_0 + w = \rho_0 H A + \rho_p H$  – тиск [3] водонасиченого ґрунту, Па;  $p_0$  – тиск ґрунту, Па;  $w$  – тиск рідини у безнапірному водонасиченому пласті, Па;  $\rho_0$  – питома вага ґрунту, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_p$  – питома вага рідини (води), кг/м<sup>3</sup>;  $H$  – глибина, м;  $A = \text{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)$  – коефіцієнт горизонтального розпору;  $\varphi$  – кут внутрішнього тертя ґрунту, град;  $P_k = \frac{k_0 u_r}{2\pi r_2 l}$ ,

$P_\alpha = -\rho_0 c_0 \frac{\partial u_r}{\partial t}$  – складові сили, пов'язані з

пружинними та демпферуючими властивостями ґрунту, Па;  $k_0$  – коефіцієнт жорсткості породи, Н/м;  $l$  – довжина прихопленої ділянки бурильної колони, м;  $c_0$  – швидкість поширення хвиль у прихоплюючому середовищі, м/с;  $u_r, \frac{\partial u_r}{\partial t}$  – радіальні переміщення та швидкості поширення прихопленої труби.

Тиск ударної хвилі  $p(t)$  на внутрішню стінку труби радіусом  $r_1$  задамо залежністю

$$p(t) = \begin{cases} p_m \frac{t}{\theta_1}, & 0 \leq t \leq \theta_1; \\ p_m e^{-\frac{t-\theta_1}{\theta_2}}, & t \leq \theta_1, \end{cases}$$

де:  $p_m$  – амплітуда імпульсного тиску, Па;  $\theta_1$  – час наростання імпульсу, с;  $\theta_2$  – характерний час спаду навантаження, с.

У циліндричній системі координат  $r, z, \theta$  для осесиметричного випадку, коли змінні є функціями координат  $r, z$ , рівняння руху можна подати у вигляді:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = \rho \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}. \quad (3)$$

Для одержання замкненої системи до рівнянь (2) додамо рівняння, записані на основі закону Гука:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \lambda \Omega + 2\mu \frac{\partial u_r}{\partial r}, \\ \sigma_z &= \lambda \Omega + 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z}, \\ \sigma_\theta &= \lambda \Omega + 2\mu \frac{u_r}{r}, \\ \tau_{rz} &= \mu \left( \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

$\lambda, \mu$  – сталі Ламе;

$u_r, u_z$  – переміщення вздовж осей  $r$  та  $z$  відповідно;

$\Omega$  – об'ємна деформація,

$$\Omega = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_z}{\partial z}. \quad (5)$$

Як бачимо, задачу сформульовано у двовимірній постановці. Розв'язок її будемо шукати у змішаній формі (в напруженнях  $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\theta, \tau_{rz}$  і переміщеннях  $u_r, u_z$ ).

Початкові умови прийемо наступними:

$$u_r(r, 0) = u_z(r, 0) = 0; \quad (6)$$

– розподіл напружень  $\sigma_r$  та  $\sigma_\theta$  по товщині циліндра беремо із розв'язку задачі Ламе

[4] для товстостінного навантаженого по зовнішній поверхні циліндра

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r(r, 0) &= -\frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left( 1 - \frac{r_1^2}{r^2} \right) p_{zp}, \\ \sigma_\theta(r, 0) &= -\frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left( 1 + \frac{r_1^2}{r^2} \right) p_{zp}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\sigma_z(r, 0) = 0, \quad \tau_{rz}(r, 0) = 0. \quad (8)$$

Граничні умови прийемо такими:

– для внутрішньої поверхні труби ( $r = r_1, 0 \leq z \leq l$ )

$$\sigma_r(r_1, t) = p(t), \quad \tau_{rz}(r_1, t) = 0; \quad (9)$$

– для зовнішньої поверхні труби ( $r = r_2, 0 \leq z \leq l$ )

$$\sigma_r(r_2, t) = p_{зовн}, \quad \tau_{rz}(r_2, t) = 0; \quad (10)$$

– для торцевих поверхонь ( $z = 0, r_1 \leq r \leq r_2$  та  $z = l, r_1 \leq r \leq r_2$ )

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r(0, t) = 0, \tau_{rz}(0, t) = 0, \\ \sigma_r(l, t) = 0, \tau_{rz}(l, t) = 0; \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

– для кутових точок 1, 2, 3, 4 (рис. 2) виконуються граничні умови для відповідних поверхонь (зовнішньої або внутрішньої) і торців. Так, наприклад, для точки 1 (рис. 2) отримаємо

$$\begin{aligned} \sigma_r(r_2, t) &= p_{зовн}, \quad \sigma_z(0, l) = 0, \\ \tau_{rz}(0_1, t) &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

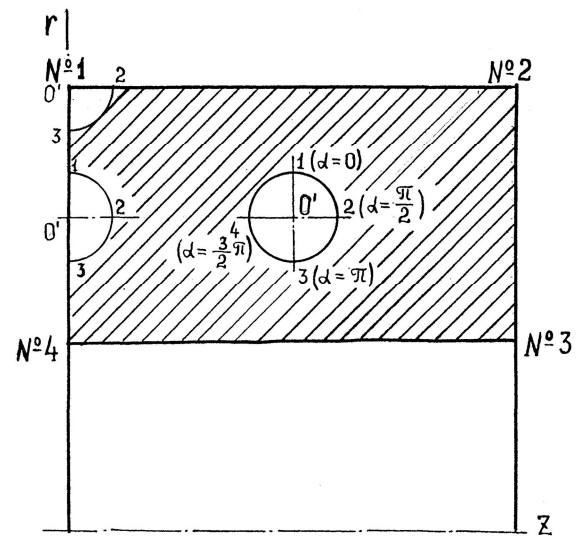


Рисунок 2 – Досліджувана ділянка труби, для якої складаємо граничні умови

Для з'ясування особливостей НДС прихопленої ділянки труб в умовах, що розглядаються, задачу (3) – (12) розв'язано методом просторових характеристик [5-7]. Для цього попередньо систему рівнянь (3) – (5) разом з початковими та крайовими умовами подано різнице-вими рівняннями в безрозмірному вигляді [5]. Далі було розроблено алгоритм і створено програму, за допомогою якої можна знаходити на-

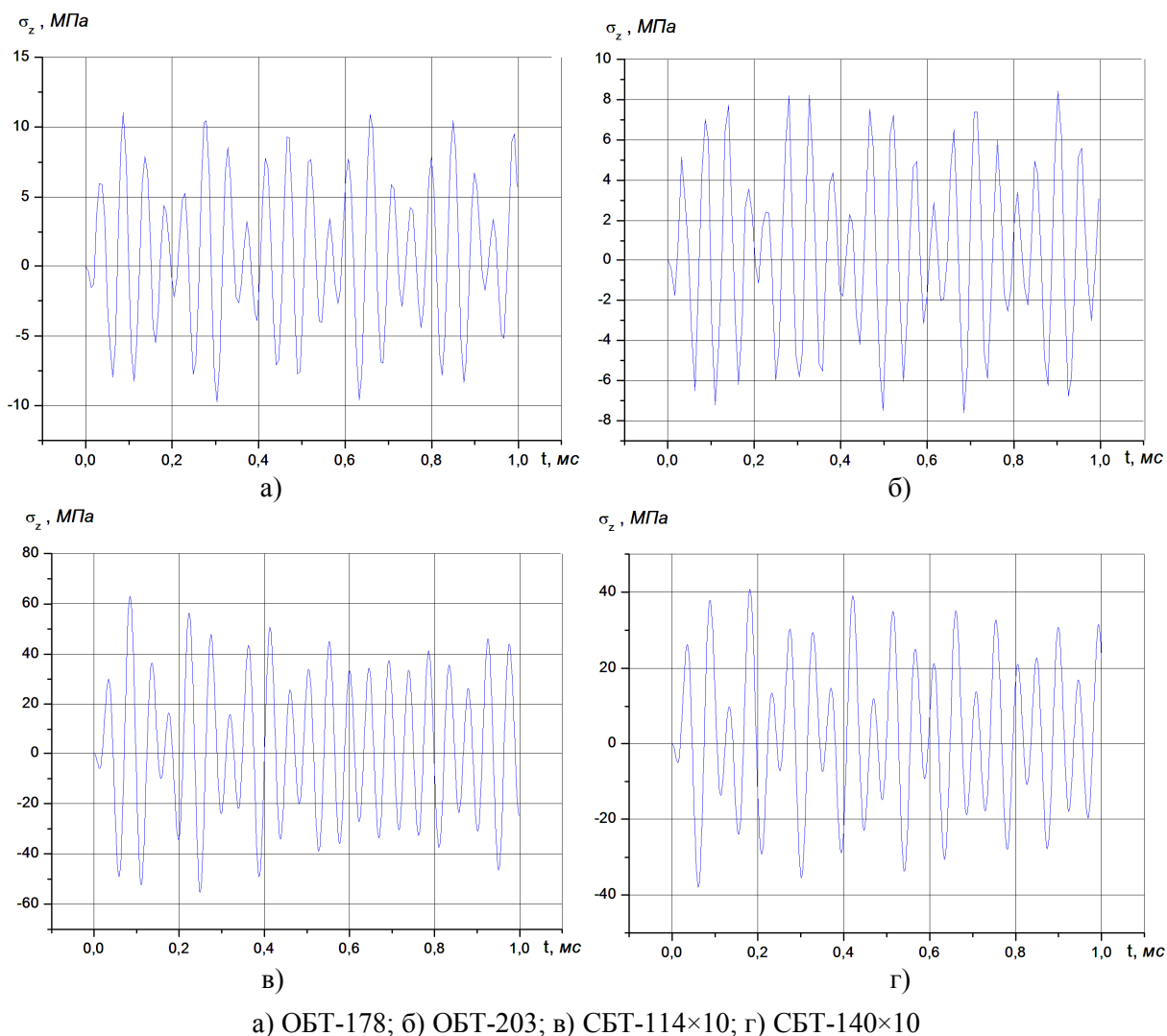


Рисунок 3 – Графіки зміни в часі осевого напруження  $\sigma_z$  на зовнішній поверхні прихопленої труби

пруження і переміщення (як функцій часу) в фіксованих точках циліндра (у нашому випадку – на зовнішній поверхні прихопленої труби).

Розрахунки проводились за таких вихідних даних:

амплітуда імпульсу тиску  
 $p_m = 0,2 \cdot 10^6$  Па;

час наростання імпульсу  $\theta_1 = 20 \cdot 10^{-6}$  с;

характерний час спаду навантаження  
 $\theta_2 = 80 \cdot 10^{-6}$  с;

модуль Юнга  $E = 0,19 \cdot 10^6$  МПа;

коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0,27$ ;

густина матеріалу труби  
 $\rho = 0,774 \cdot 10^4$  кг/м<sup>3</sup>;

густина матеріалу прихоплюючого середовища  
 $\rho_0 = 0,2 \cdot 10^4$  кг/м<sup>3</sup>;

швидкість поширення хвиль у прихоплюючому середовищі  $c_0 = 0,557 \cdot 10^4$  м/с;

верхня межа прихоплення  $H = 1000$  м;

коефіцієнт горизонтального розпору  
 $A = 0,57$ ;

питома вага рідини (води)  
 $\rho_p = 0,1 \cdot 10^4$  кг/м<sup>3</sup>;

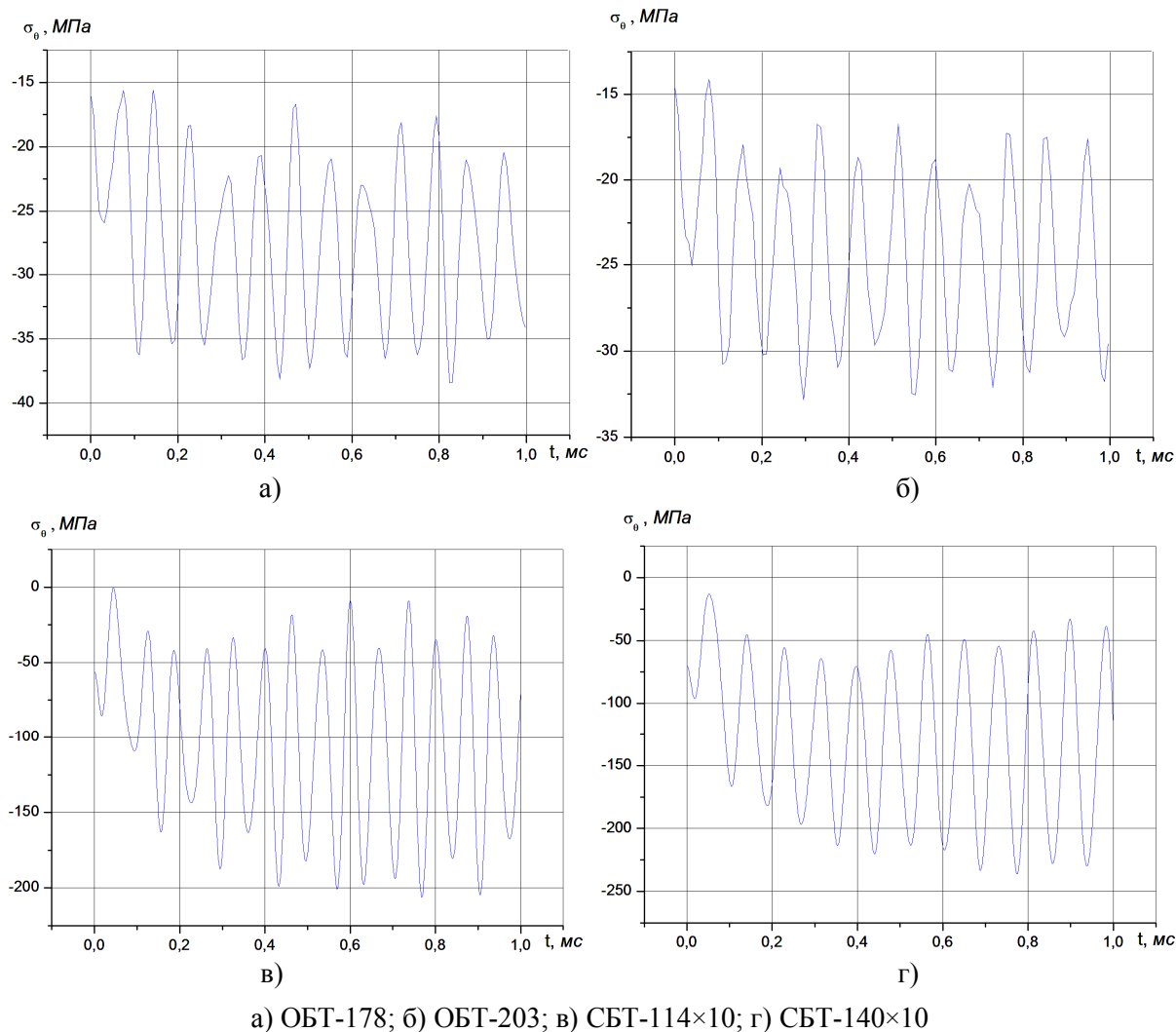
довжина прихопленої ділянки  $l = 10$  м;

коефіцієнт жорсткості породи  
 $k_0 = 50 \cdot 10^6$  Н/м.

Геометричні характеристики прихоплених труб наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Геометричні характеристики труб

Шифр	Зовнішній діаметр D, мм	Внутрішній діаметр d, мм	Товщина стінки Δ, мм
ОБТ-178	178	80	49
ОБТ-203	203	80	61,5
СБТ-114×10	114	94	10
СБТ-140×10	140	120	10



**Рисунок 4 – Графіки зміни в часі колового напруження  $\sigma_{\theta}$  на зовнішній поверхні прихопленої труби**

Результати розрахунків свідчать [1], що зменшення амплітуд колових напружень на внутрішній поверхні ( $r = r_1$ ) прихопленої труби призводить до змін характеру залежності  $\sigma_{\theta}(t)$ . На час дії імпульсу (0,2мс) амплітуди напружень  $\sigma_{\theta}$  доволі значні, а після припинення дії імпульсу процес стає усталеним з амплітудою втричі меншою.

Так само характеризують процес графіки залежностей  $u_r(t)$ . На період дії імпульсу труба “дихає” з амплітудами у 5-6 разів більшими, ніж в усталеному режимі коливальності. Це і сприяє вивільненню прихопленої ділянки бурильного інструменту.

Проаналізуємо рисунки 3-6, одержані за незначного демпфування. Рисунки 3, 4 свідчать, що товщина стінки труби  $\Delta$  суттєво впливає на амплітуди осьових  $\sigma_z$  та колових  $\sigma_{\theta}$  напружень на зовнішній стінці труби. Так, для ОБТ ці напруження в 5-6 разів менші відповідних напружень для СБТ.

Радіальні зміщення  $u_r$  зовнішньої поверхні труби при заданих параметрах збурення (рис.5) мають суттєво більші значення для СБТ 114×10, СБТ-140×10 у порівнянні з ОБТ-178, ОБТ-203, що свідчить про можливість руйнування накладених в’язей у цих випадках.

Появу субгармонік на графіках  $\sigma_{\theta}(r_2, t)$ ,  $u_r(r_2, t)$  можна пояснити відбиванням хвиль від зовнішньої та внутрішньої поверхонь труби.

Графіки зміни в часі безрозмірної повної енергії циліндра (рис.6) використовуються для оцінки збійності хвильового процесу. Зрозуміло, що чим менша жорсткість труби, тим більшу енергію вона здатна накопичити. Порівнюючи повну внутрішню енергію циліндра з роботою, виконаною ударною хвилею з деформування циліндра, можна оцінити похибку обчислень (у нас вона не перевищувала 2,3%). Оскільки графіки  $W(t)$  подані на проміжку часу тривалістю 1 мс, то на них ще не видно характерного затухання процесу, обумовленого втратою частини енергії на виконання роботи з

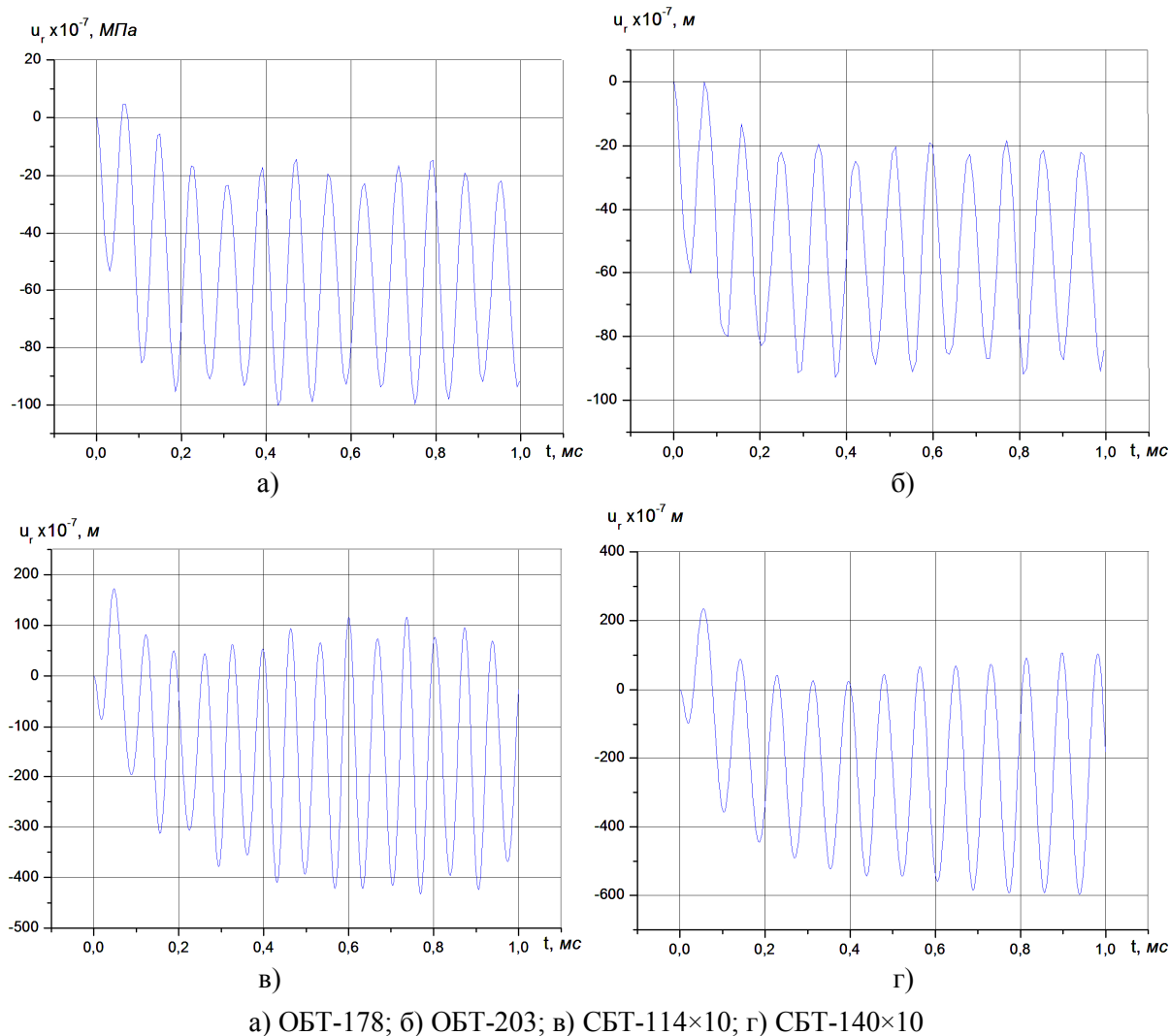


Рисунок 5 – Графіки зміни в часі радіальних переміщень  $u_r$  зовнішньої поверхні прихопленої труби

послаблення в'язей, накладених прихоплюючим середовищем. Якщо ж процес розбіжний, то спостерігається різке зростання повної внутрішньої енергії і дисбаланс між енергією та роботою.

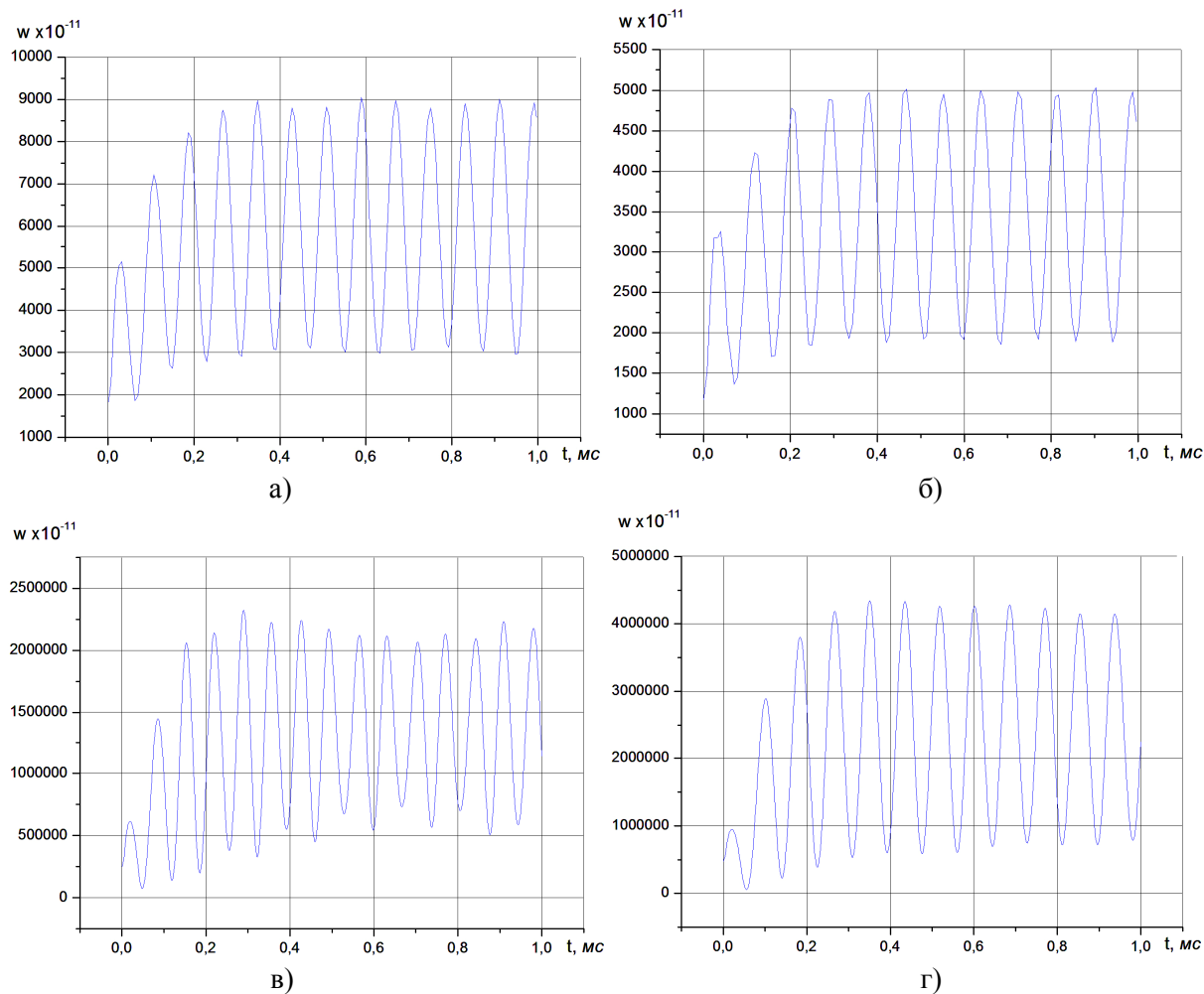
### Висновки

Методом просторових характеристик розв'язано осесиметричну задачу динамічної пружності колового товстостінного циліндра.

Оцінено напружено-деформований стан прихопленої ділянки бурильної колони під дією вибухової хвилі на внутрішню стінку труби. На графіках зміни в часі радіальних переміщень зовнішньої поверхні труби та колових напружень на ній спостерігається поява субгармонік, що пояснюється відбиванням пружних хвиль від зовнішньої та внутрішньої поверхонь труби.

### Література

- 1 Мойсшин В.М. Застосування прострільно-вибухової апаратури для ліквідації прихоплень в геологорозвідувальному бурінні / В.М.Мойсшин, С.В.Гошовський // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 1997. – Вип. 34. – С. 69-74.– Серія: Буріння нафтових і газових свердловин, Розвідка та експлуатація нафтових і газових родовищ.
- 2 Техническая инструкция по прострелочно-взрывным работам в скважинах. – М.: Недра, 1978. – 64 с.
- 3 Строительство подземных сооружений: Справочное пособие / [М.Н.Шуплик, Я.М.Месхидзе, И.О. Королёв и др.]; под ред. М.Н.Шуплика. – М.: Недра, 1990. – 384 с.
- 4 Справочник по сопротивлению материалов / Г.С.Писаренко, А.П.Яковлев, В.В.Матвеев; под ред. Г.С.Писаренко. – К.: Наукова думка, 1988. – 736 с.



а) ОБТ-178; б) ОБТ-203; в) СБТ-114×10; г) СБТ-140×10

**Рисунок 6 – Графіки зміни в часі безрозмірної повної внутрішньої енергії  $W$  прихопленої труби**

5 Мойсшин В.М. Застосування методу просторових характеристик для вивчення напружено-деформованого стану прихопленої бурильної колони під дією вибухової хвилі / В.М.Мойсшин, В.Д.Яцишин // Прикарпатський вісник НТШ. Число. – 2009. – №1(5). – С. 43-59.

6 Клифтон Р.Дж. Разностный метод в плоских задачах динамической упругости // Сб. переводов “Механика”. – 1968. – №1.

7 Сабодаш П.Ф. Применение метода пространственных характеристик к решению осесимметричных задач по распространению упругих волн / П.Ф.Сабодаш, Р.А.Чередниченко // ПМТФ. – 1971. – № 4.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
11.02.10  
Рекомендована до друку професором  
Коцкуличем Я.С.*