

ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИХОПЛЕНОЇ ДІЛЯНКИ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ ПІД ДІЄЮ УДАРНОЇ ХВИЛІ ВИБУХУ

В.М.Мойсишин, В.Д.Яцишин, В.І.Векерик, Т.М.Даляк

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

Методом просторових характеристик розв'язано осесиметричну задачу динамічної пружності прихопленої ділянки бурильної колони. Проаналізовано вплив демпферувальних властивостей прихоплюючої породи на напружено-деформований стан ділянки бурильної колони під дією вибухової хвилі на внутрішню стінку труби.

Ключові слова: метод просторових характеристик, осесиметрична задача динамічної пружності, напружено-деформований стан, прихоплена ділянка бурильної колони, коефіцієнт демпферування гірської породи, ударна хвиля вибуху.

По методу пространственных характеристик решена осесимметрическая задача динамической упругости прихваченного участка бурильной колонны. Проанализировано влияние демпфирующих свойств прихватывающей породы на напряженно-деформируемое состояние участка бурильной колонны под воздействием взрывной волны на внутреннюю стенку трубы.

Ключевые слова: метод пространственных характеристик, осесимметрическая задача динамической упругости, напряженно-деформированное состояние, прихваченный участок бурильной колонны, коэффициент демпфирования горной породы, ударная волна взрыва.

By the method of spatial descriptions the axis symmetric task of dynamic resiliency of the grabbed area of boring column is decided. Influence of dempfiral properties of grabbing breed on the tense deformed being of area of boring column under act of explosive wave on the internal wall of pipe is analysed.

Keywords: method of spatial descriptions, axis symmetric task of dynamic resiliency, tense-deformed being, grabbed area of boring column, coefficient of dempfiration of mountain breed, shock wave of explosion.

Актуальність задачі дослідження

Торпедування у свердловині, що ґрунтується на використанні енергії вибуху, є одним з найбільш ефективних методів ліквідації аварій та ускладнень, які виникають у процесі спорудження свердловин. Його застосовують для “струшування” бурильного інструменту, розгвинчування різьбових з’єднань, обривання колони з метою підняття на поверхню вільної ділянки труб [1].

При вибуховому “струшуванні” перед початком торпедування визначають межі прихоплення, прикладають до колони бурильних труб цілком визначені силу натягу і крутний момент та перекидають усю прихоплену ділянку зарядом [2]. Після виконання цих операцій заряд підривають. У результаті дії ударної хвилі на внутрішню стінку колони затрубна порода відкидається і ущільнюється.

При вибуховому розгвинчуванні труб визначають верхню межу прихоплення, прикладають до колони натяг і крутний момент у бік розгвинчування [2]. Натягом розвантажують муфтове з’єднання, навпроти якого розміщують торпеду. Після цього проводять вибух, різьбове з’єднання розгвинчують і витягують звільнену частину колони. За сприятливих умов проведення декілька разів цикл “розгвинчування – промивання – згвинчування – розходження – нове на більшій глибині розгвинчування” дає змогу повністю вивільнити прихоплений інструмент.

Таким чином, з’ясування особливостей напружено-деформованого стану (НДС) бурильних труб є актуальною задачею під час проведення вибухових робіт у свердловині з метою ліквідації прихоплень бурильної колони без руйнування елементів останньої.

Мета і постановка задачі дослідження

Метою пропонованої роботи є вивчення НДС прихопленої бурильної труби, внутрішня стінка якої піддана динамічній дії тиску, а зовнішня взаємодіє з в’язко-пружним середовищем.

Затрубний матеріал, що взаємодіє з зовнішньою стінкою радіуса r_2 (рис. 1), змодельовано силою тиску p_{ep} водонасиченої породи [3], пружними і демпфувальними елементами. Силу $p_{зовн}$, що діє на зовнішню стінку труби, подамо сумою

$$p_{зовн} = p_{ep} + p_k + p_\alpha, \quad (1)$$

де: $p_{ep} = p_0(z) + w = p_0(z) + \rho_p H$ – тиск водонасиченої породи, Па; $p_0(z)$ – тиск породи, як функція координати z (при розрахунках прийнято, що він змінюється за лінійним законом), Па; w – тиск рідини у безнапірному водонесному пласті, Па; ρ_p – питома вага рідини

(води), кг/м^3 ; H – глибина, м; $p_k = \frac{k_0 u_r}{2\pi r_2 l}$,

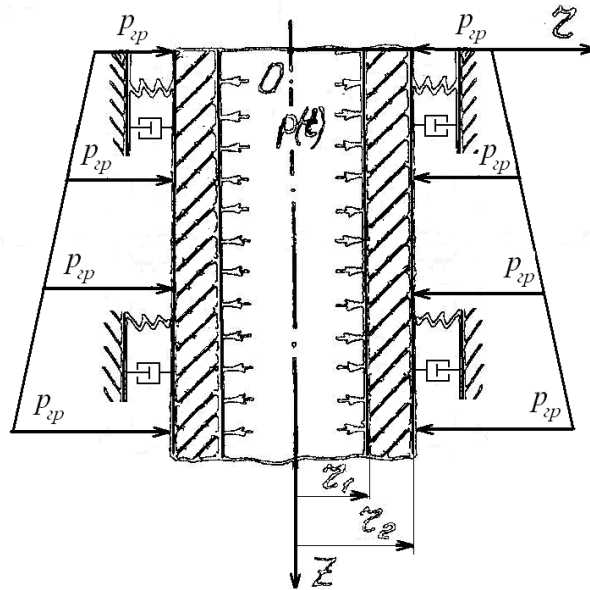


Рисунок 1 – Розрахункова схема

$p_\alpha = -\rho_0 c_0 \frac{\partial u_r}{\partial t}$ – складові сили, пов'язані з пружинними та демпфувальними властивостями породи, Па; k_0 – коефіцієнт жорсткості породи, Н/м; l – довжина прихопленої ділянки бурильної колони, м; ρ_0 – питома вага породи, кг/м³; c_0 – швидкість поширення хвиль у прихоплюючому середовищі, м/с; u_r , $\frac{\partial u_r}{\partial t}$ – радіальні переміщення та швидкості прихопленої труби.

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

$$p(t) = \begin{cases} p_m \frac{t}{\theta_1}, & 0 \leq t \leq \theta_1; \\ p_m e^{-\frac{t-\theta_1}{\theta_2}}, & t \leq \theta_1, \end{cases} \quad (2)$$

де: p_m – амплітуда імпульсу тиску, Па; θ_1 – час наростання імпульсу, с; θ_2 – характерний час спаду навантаження, с.

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

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = \rho \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}. \quad (4)$$

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

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \lambda \Omega + 2\mu \frac{\partial u_r}{\partial r}, \\ \sigma_z &= \lambda \Omega + 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z}, \\ \sigma_\theta &= \lambda \Omega + 2\mu \frac{u_r}{r}, \\ \tau_{rz} &= \mu \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

де: λ , μ – сталі Ламе;

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

Ω – об'ємна деформація,

$$\Omega = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_z}{\partial z}. \quad (6)$$

Як бачимо, задачу сформульовано у двовимірній постановці. Розв'язок її будемо шукати у змішаній формі (в напруженнях σ_r , σ_z , σ_θ , τ_{rz} і переміщеннях u_r , u_z).

Початкові умови прийемо такими:

$$u_r(r, 0) = u_z(r, 0) = 0; \quad (7)$$

розподіл напружень σ_r та σ_θ по товщині циліндра беремо із розв'язку задачі Ламе [4] для товстостінного навантаженого по зовнішній поверхні циліндра

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r(r, 0) &= -\frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_1^2}{r^2} \right) p_{zp}, \\ \sigma_\theta(r, 0) &= -\frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2} \right) p_{zp}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\sigma_z(r, 0) = 0, \quad \tau_{rz}(r, 0) = 0. \quad (9)$$

Граничні умови задачі наведено в [8], спосіб виведення різницьових рівнянь та чисельне

представлення частинних похідних запропоновано у роботі [5]. Авторами розроблено алгоритм і створено програму, яка дає змогу знаходити напруження і переміщення (як функції часу) в фіксованих точках циліндра.

Аналіз результатів дослідження

Розрахунки проводилися 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/м³; густина матеріалу прихоплюючого середовища $\rho_0 = 0,2 \cdot 10^4$ кг/м³; швидкість поширення хвиль у прихоплюючому середовищі $c_0 = 0,557 \cdot 10^4$ м/с; верхня межа прихоплення $H = 1000$ м; питома вага рідини (води) $\rho_p = 0,1 \cdot 10^4$ кг/м³; довжина прихопленої ділянки $l = 2$ м; коефіцієнт жорсткості породи $k_0 = 50 \cdot 10^6$ Н/м. При обчисленнях прийнято, що функція $p_0(z)$ має вигляд $a(1 + 0,05z)$, де $a = 21,8$ МПа.

Проаналізуємо напружений стан і радіальні зміщення бурильної труби СБТ 114×10 (зовнішній діаметр $D = 0,114$ м; внутрішній діаметр $d = 0,080$ м; товщина стінки $\Delta = 0,010$ м) та обважненої бурильної труби ОБТ-203 ($D = 0,203$ м; $d = 0,080$ м; $\Delta = 0,0615$ м).

Оскільки переміщення точок прихопленої поверхні незначні, то жорсткість прихоплюючої породи мало впливає на хвильовий процес. І навпаки, так як швидкості точок поверхні досягають помітних значень [5], то демпфування суттєво впливає на хвильовий процес (див. формули для визначення p_k, p_a). У зв'язку з цим зіставимо характеристики НДС без урахування та з урахуванням демпфувальних властивостей породи. При цьому, на відміну від статті [8], де проаналізовано результати НДС труб за незначного демпфування (порода майже суха), за прихоплююче середовище приймемо водонасичену породу, що частіше відповідає реаліям.

Результати розрахунків наведено на рис. 2-7. Вони свідчать, що товщина стінки труби Δ суттєво впливає на характеристики НДС прихопленої ділянки колони. Для обважнених бурильних труб вони в декілька разів менші.

Демпфування працює як фільтр низьких частот, тобто тіло труби пропускає низькі частоти, зменшуючи амплітуди, і майже повністю затримує високі частоти. З графіків видно, що після вибуху хвильовий процес згасає досить швидко, і вже за 0,8-1 мс труба виходить на початковий статичний режим навантаження.

Графіки зміни в часі безрозмірної повної енергії W прихопленої ділянки труби (рис. 5) використовуються для оцінки збіжності хвильового процесу. Порівняння повної внутрішньої енергії розглядуваної ділянки труби з роботою, виконаною ударною хвилею з деформування циліндра, дає змогу оцінити похибку обчислень (у нас вона не перевищувала 5%).

Рис. 6-7 свідчать, що демпфування суттєво знижує як абсолютні величини осьового σ_z та колового σ_θ напружень, так і їхні діапазони зміни по товщині стінки труби. У випадку СБТ 114×10 (рис. 6б), зокрема, осьове напруження залишається практично незмінним при переході вздовж тіла труби від одного колового перерізу до іншого. Крайові ефекти спостерігаються в діапазоні від 0 до 0,5 м з кожного кінця прихопленої ділянки бурильної колони.

Висновки

Оцінено напружено-деформований стан прихопленої ділянки бурильної колони під дією вибухової хвилі на внутрішню стінку та тиску водонасиченої породи на зовнішню стінку труби. Демпфування прихоплюючої породи пропускає низькочастотні гармоніки, зменшуючи їх амплітуди, і затримує високочастотні гармоніки, а також у кілька разів зменшує як абсолютні величини напружень, так і їхні діапазони зміни по товщині стінки труби.

Запропоновано методику визначення осьових σ_z і колових σ_θ напружень в стінці труби та радіальних зміщень u_r зовнішньої поверхні прихопленої труби під дією ударної хвилі вибуху, які дозволяють обґрунтовано підбирати масу циліндричного заряду вибухової речовини з тим, щоб уникнути залишкових деформацій при "струшуванні" бурильного інструменту та розгвинчуванні різьбових з'єднань.

Література

- 1 Мойсишин В.М. Застосування прострільно-вибухової апаратури для ліквідації прихоплень в геологорозвідувальному бурінні / В.М.Мойсишин, 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.

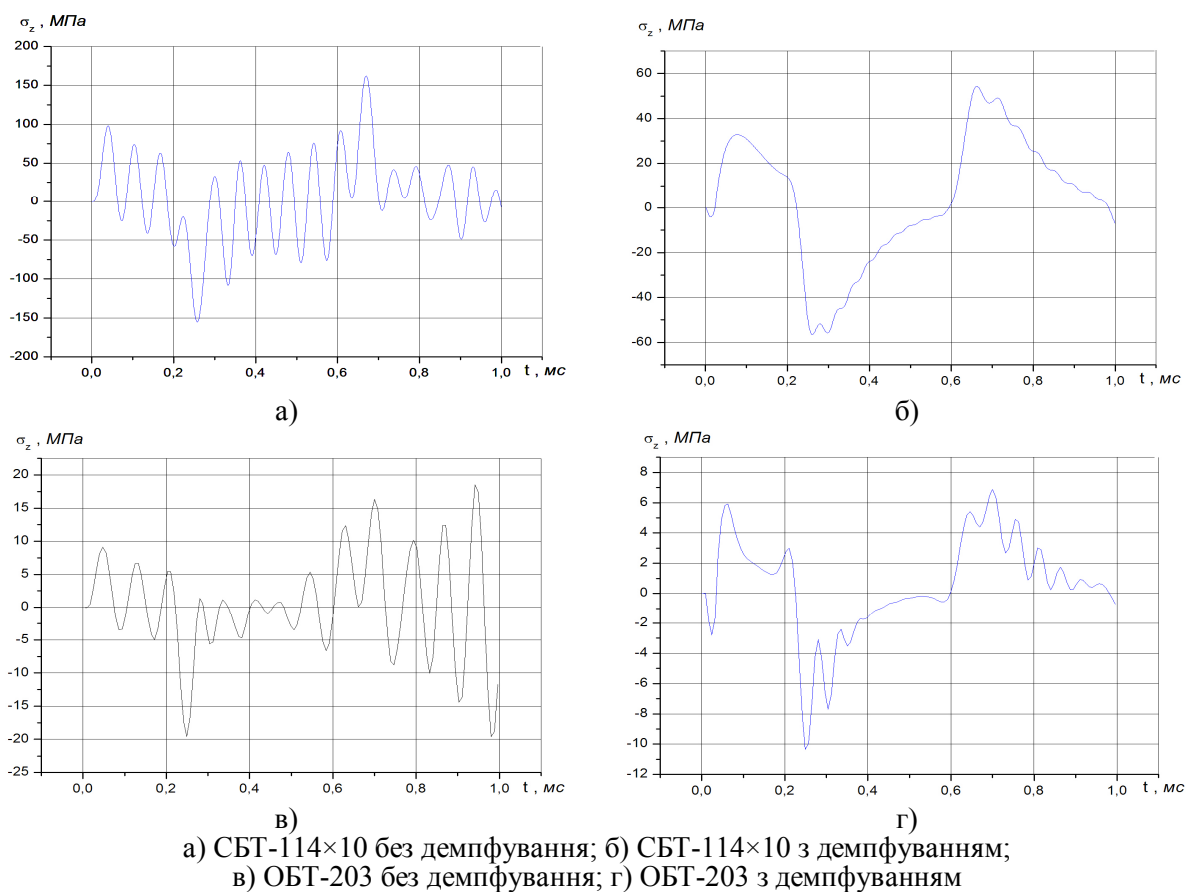


Рисунок 2 – Графіки зміни в часі осевого напруження σ_z на зовнішній поверхні прихопленої труби при $z=1$ м

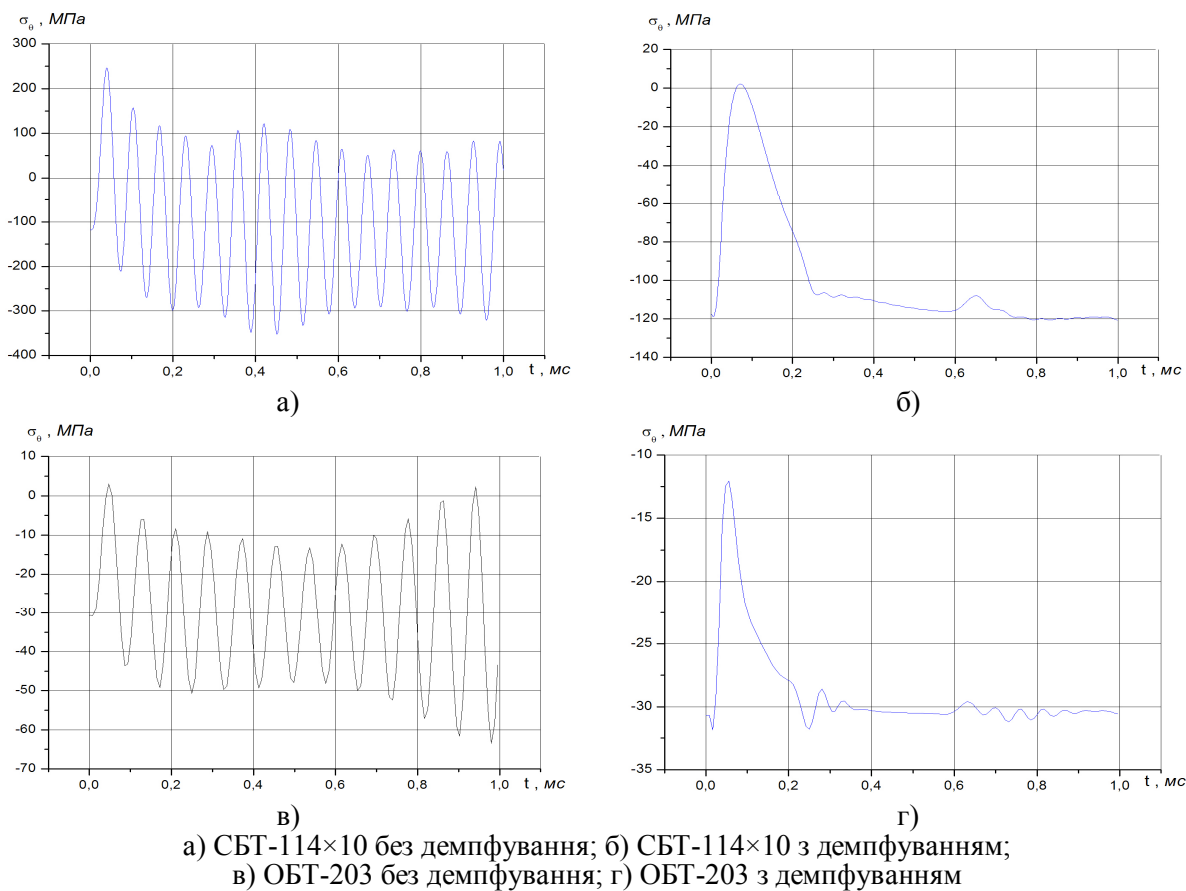
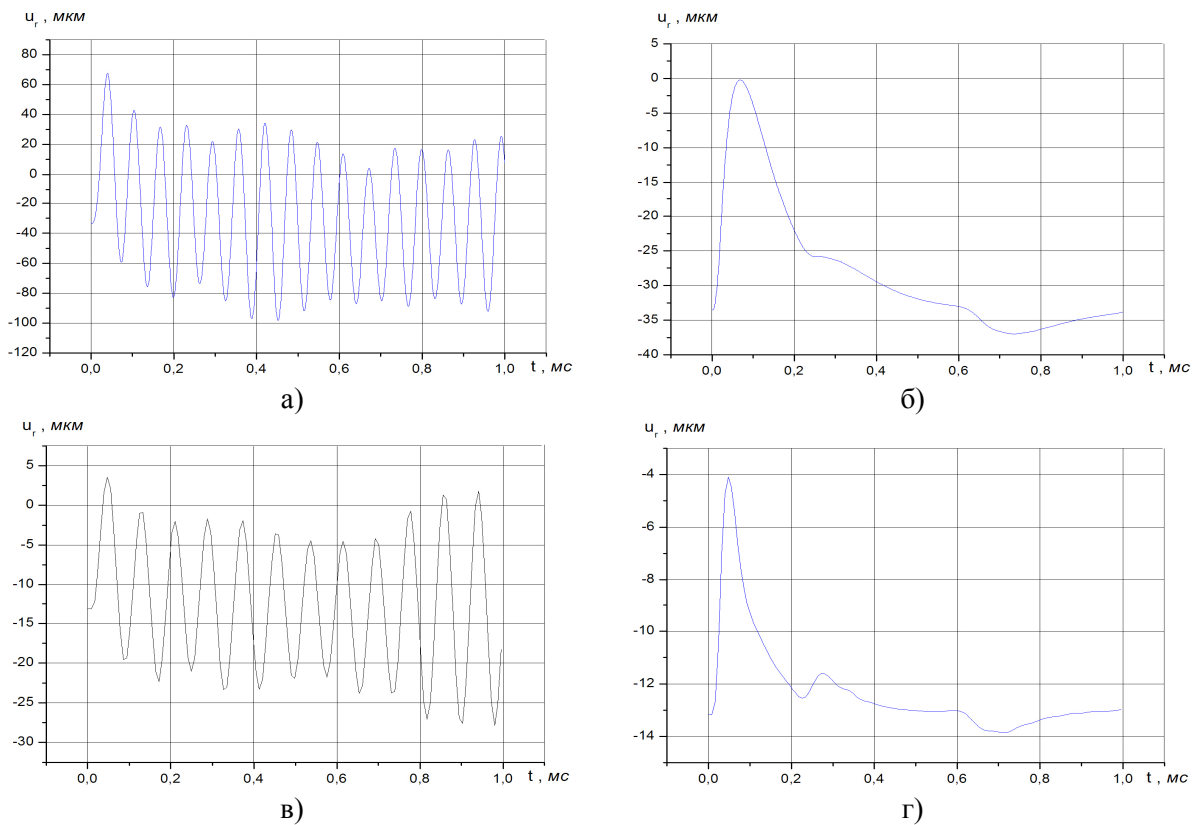
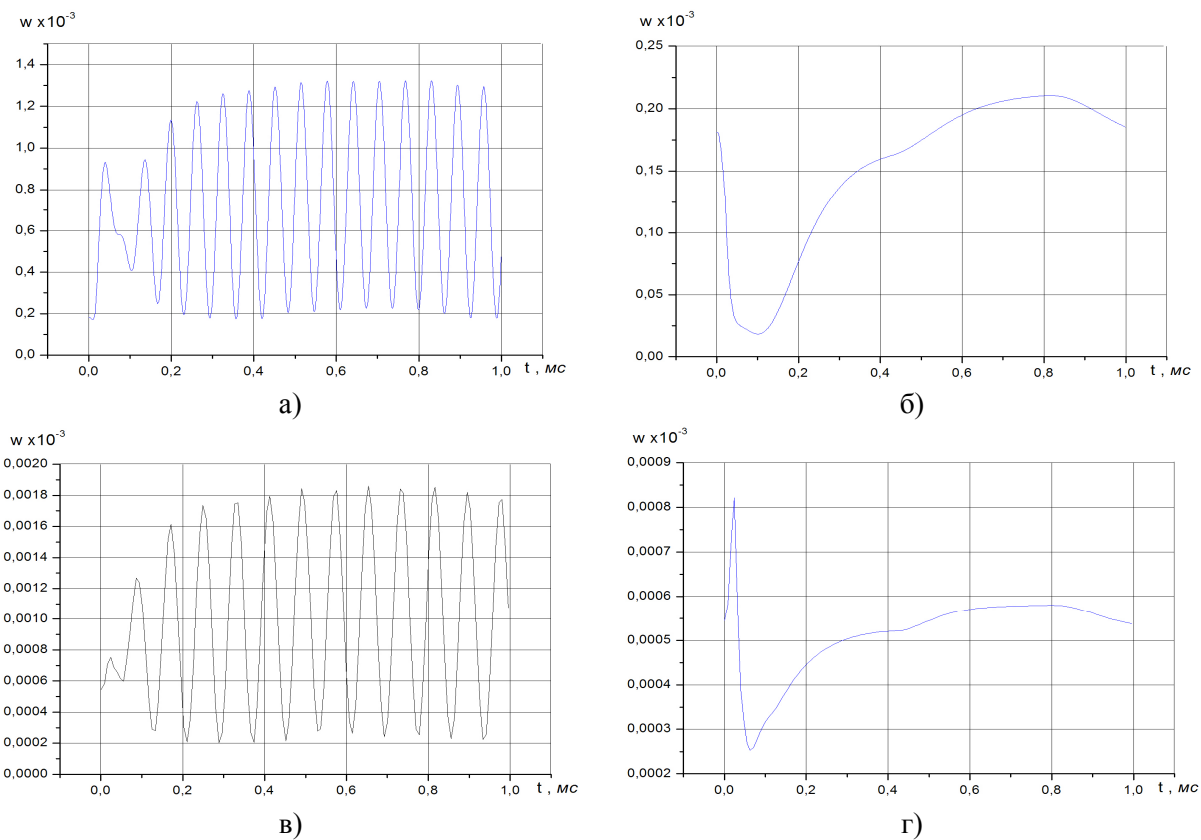


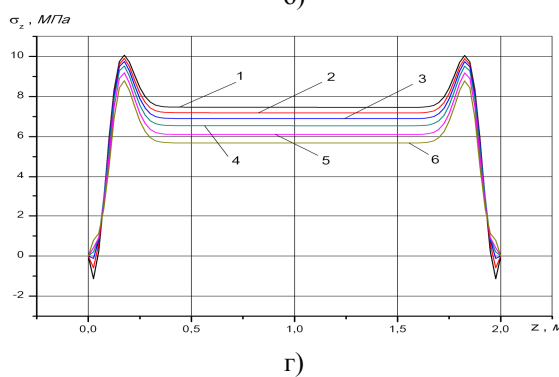
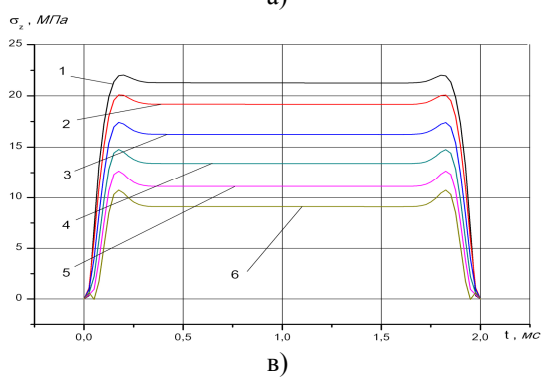
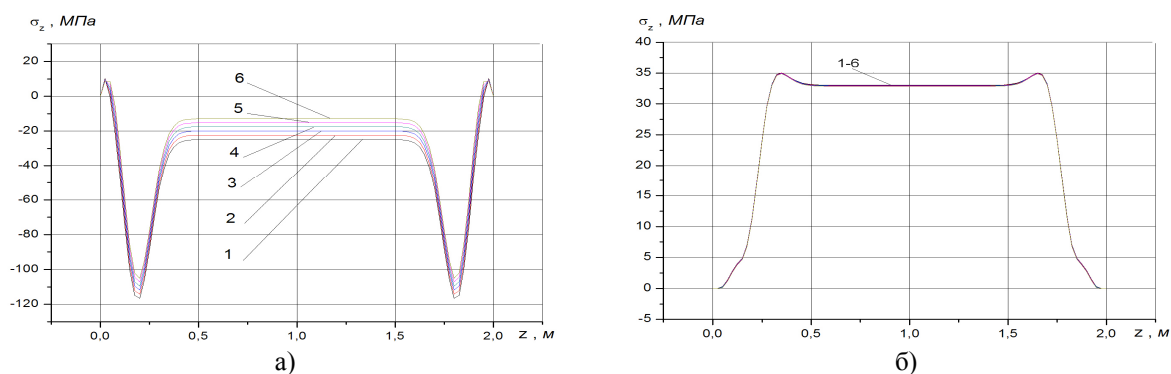
Рисунок 3 – Графіки зміни в часі колового напруження σ_θ на зовнішній поверхні прихопленої труби при $z=1$ м



а) СБТ-114×10 без демпфування; б) СБТ-114×10 з демпфуванням;
 в) ОБТ-203 без демпфування; г) ОБТ-203 з демпфуванням
Рисунок 4 – Графіки зміни в часі радіальних переміщень u_r зовнішньої поверхні прихопленої труби при $z=1$ м

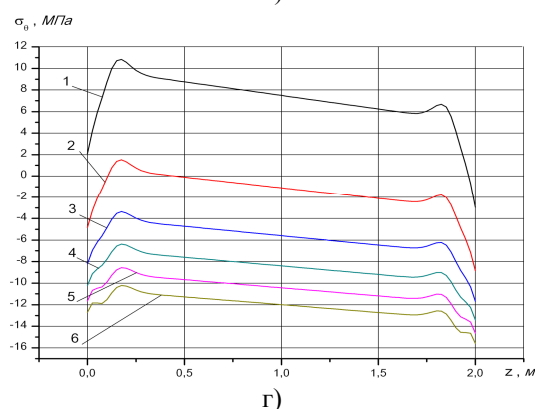
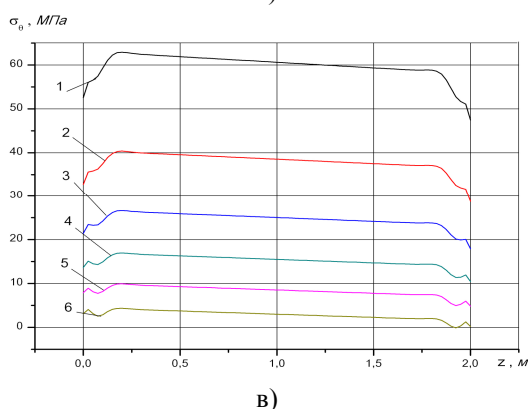
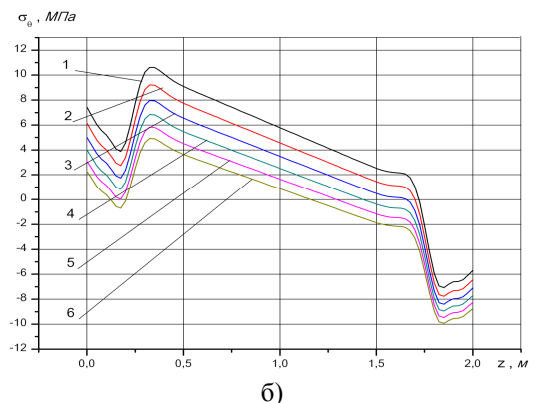
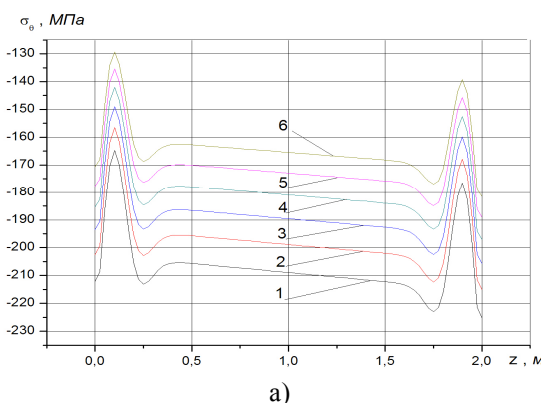


а) СБТ-114×10 без демпфування; б) СБТ-114×10 з демпфуванням;
 в) ОБТ-203 без демпфування; г) ОБТ-203 з демпфуванням
Рисунок 5 – Графіки зміни в часі безрозмірної повної внутрішньої енергії W прихопленої труби при $z=1$ м



1 – внутрішня поверхня труби ($\Delta = 0$); 2 – $0,2\Delta$; 3 – $0,4\Delta$; 4 – $0,6\Delta$; 5 – $0,8\Delta$; 6 – зовнішня поверхня труби
 а) СБТ-114×10 без демпфування ($t = 0,08$ мс); б) СБТ-114×10 з демпфуванням ($t = 0,08$ мс);
 в) ОБТ-203 без демпфування ($t = 0,049$ мс); г) ОБТ-203 з демпфуванням ($t = 0,053$ мс)

Рисунок 6 – Графіки зміни осевого напруження σ_z по довжині z прихопленої ділянки бурильної колони в різних колових перерізах тіла труби



1 – внутрішня поверхня труби ($\Delta = 0$); 2 – $0,2\Delta$; 3 – $0,4\Delta$; 4 – $0,6\Delta$; 5 – $0,8\Delta$; 6 – зовнішня поверхня труби
 а) СБТ-114×10 без демпфування ($t = 0,08$ мс); б) СБТ-114×10 з демпфуванням ($t = 0,08$ мс);
 в) ОБТ-203 без демпфування ($t = 0,049$ мс); г) ОБТ-203 з демпфуванням ($t = 0,053$ мс)

Рисунок 7 – Графіки зміни колового напруження σ_θ по довжині z прихопленої ділянки бурильної колони в різних колових перерізах тіла труби

5 Мойсишин В.М. Застосування методу просторових характеристик для вивчення напружено-деформованого стану прихопленої бурильної колони під дією вибухової хвилі / В.М.Мойсишин, 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.

8 Мойсишин В.М. Оцінка дії вибухової хвилі на прихоплену ділянку бурильної колони / В.М.Мойсишин, В.Д.Яцишин, В.І.Векерик // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2010. – №1(34). – С. 39-45.

Стаття поступила в редакційну колегію

10.09.10

Рекомендована до друку професором

Я. С. Коцкуlichem