

**Національна академія наук України
Інститут технічної теплофізики**



**НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ
МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ТА СПЕЦІАЛІСТІВ
ІНСТИТУТУ ПРОБЛЕМ МОДЕЛЮВАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ
ІМ. Г.Є. ПУХОВА НАН УКРАЇНИ**

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ
ШВИДКОСТІ ПОШИРЕННЯ ЗВУКОВИХ ХВИЛЬ
У ТВЕРДИХ ТІЛАХ**

Кандидат технічних наук, старший
науковий співробітник відділу МОТП ІТТФ
В. Хайдуров

Київ 15.05.2020

ЗАГАЛЬНИЙ ПЛАН ДОПОВІДІ

1. Звукові хвилі та галузі їх застосування.
2. Постановки основних завдань дослідження.
3. Базові моделі поширення звукових хвиль у твердих тілах без дефектів (пряма задача).
4. Вибір засобів моделювання й дослідження хвильових процесів.
5. Математичні моделі поширення звукових хвиль у твердих тілах з дефектами (пряма задача).
6. Оптимізаційна модель визначення параметрів хвильових процесів у твердих тілах (обернена задача).

ОБ'ЄКТ, ПРЕДМЕТ ТА МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є процеси поширення звукових хвиль у твердих тілах з метою виявлення у них дефектів.

Предметом дослідження є математичні моделі поширення звукових процесів у твердих тілах та їхній аналіз з використанням засобів математичного та комп'ютерного моделювання.

Метою дослідження є розробка оптимізаційних математичних моделей визначення фізико-технічних характеристик точкового джерела збуджень звукових сигналів в однорідних пружних об'єктах (обернені задачі).

ГАЛУЗІ ЗАСТОСУВАННЯ ЗВУКОВИХ ХВИЛЬ

МЕДИЦИНА



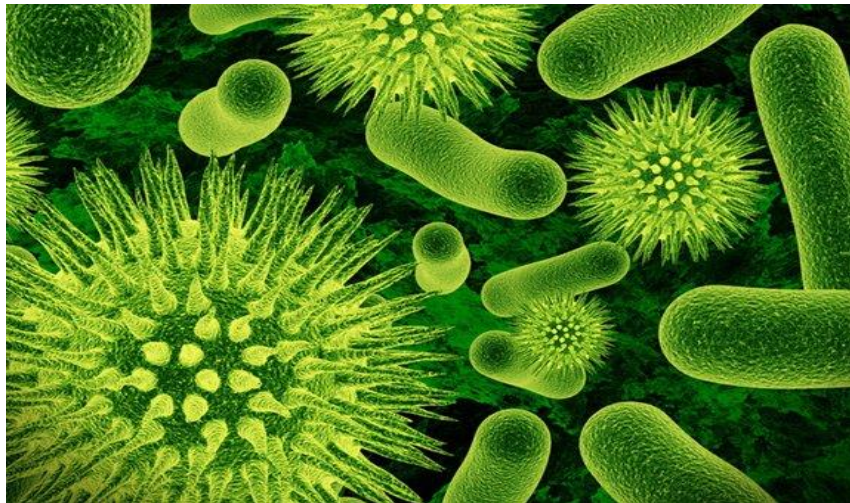
ХІМІЯ



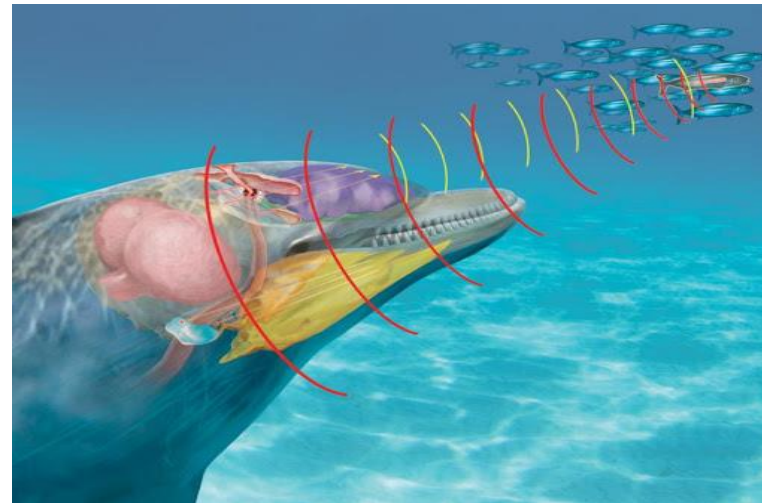
ВИРОБНИЦТВО



БІОЛОГІЯ



ЕХОЛОКАЦІЯ



ДЕФЕКТОСКОПІЯ



БАЗОВА МОДЕЛЬ ПОШИРЕННЯ ХВИЛЬ У ТВЕРДОМУ ТІЛІ

Розглядається рівняння в області $G \subset \mathbb{R}^n$

$$\frac{\partial^2 U(\bar{x}, t)}{\partial t^2} = v^2 \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 U(\bar{x}, t)}{\partial x_i^2} + f(\bar{x}, t); \quad \bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n; \quad t \in [0, T_{fin}];$$

$x_i \in [a_i, b_i]; a_i \in \mathbb{R}; b_i \in \mathbb{R}; G = [a_1, b_1] \times [a_2, b_2] \times \dots \times [a_n, b_n]; i = \overline{1, n}.$

Початкові умови мають вигляд: $U(\bar{x}, 0) = g_1(\bar{x}), \quad U_t(\bar{x}, 0) = g_2(\bar{x}).$

Граничні умови задаються в залежності від постановки задачі (що відповідає конкретному фізичному процесу).

Основні позначення: x_i – просторова координата; $\bar{x}$ – вектор координат; t – час; U – шуканий розв’язок моделі; v – швидкість поширення звуку в середовищі, T_{fin} – кінцевий час досліджень.

БАЗОВА МОДЕЛЬ ПОШИРЕННЯ ХВИЛЬ У ТВЕРДОМУ ТІЛІ

Розглядається рівняння в області $G \subset \mathbb{R}^n$

$$\frac{\partial^2 U(\bar{x}, t)}{\partial t^2} = v^2 \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 U(\bar{x}, t)}{\partial x_i^2} + f(\bar{x}, t) + \gamma \sum_{i=1}^n \frac{\partial U(\bar{x}, t)}{\partial x_i}; \quad t \in [0, T_{fin}];$$

$x_i \in [a_i, b_i]; a_i \in \mathbb{R}; b_i \in \mathbb{R}; G = [a_1, b_1] \times [a_2, b_2] \times \cdots \times [a_n, b_n]; i = \overline{1, n}.$

Початкові умови мають вигляд: $U(\bar{x}, 0) = g_1(\bar{x}), \quad U_t(\bar{x}, 0) = g_2(\bar{x}).$

Граничні умови задаються в залежності від постановки задачі (що відповідає конкретному фізичному процесу).

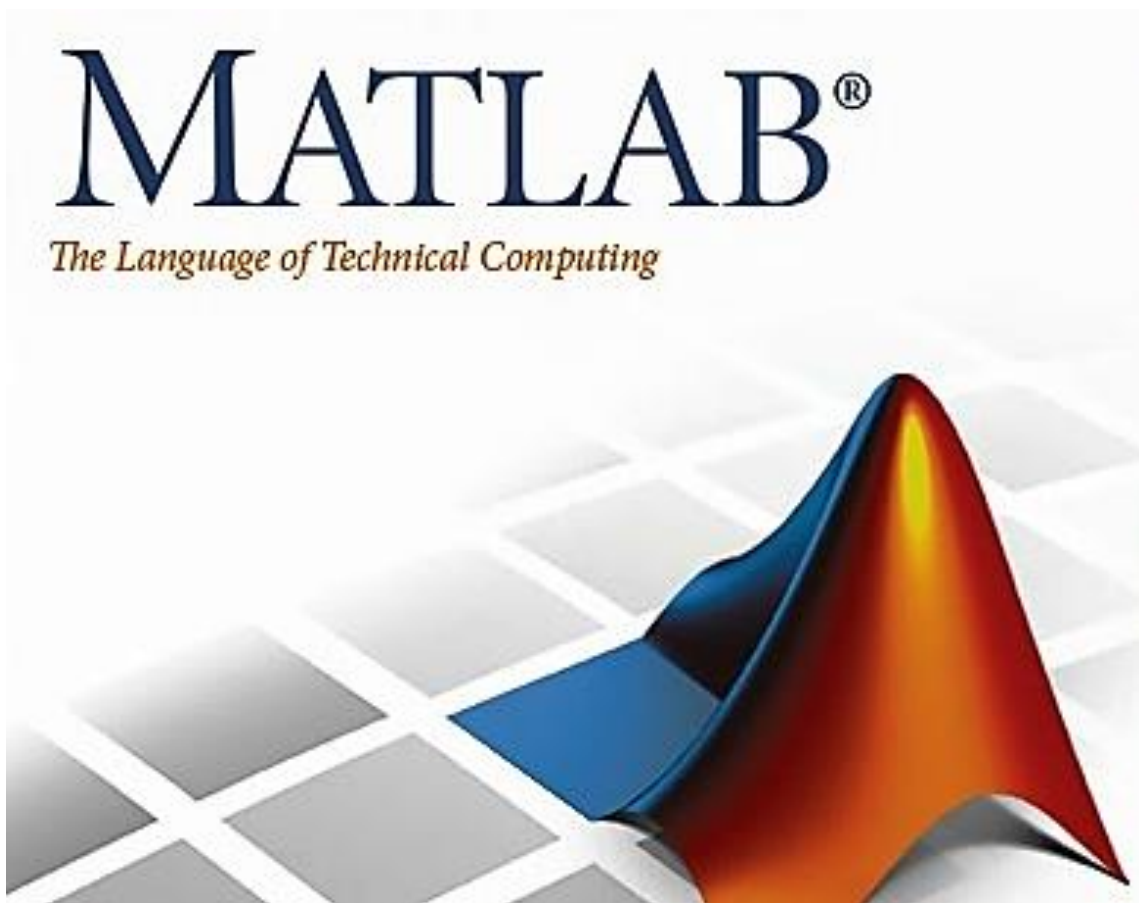
Основні позначення: x_i – просторова координата; $\bar{x}$ – вектор координат; t – час; U – шуканий розв'язок моделі; v – швидкість поширення звуку в середовищі, T_{fin} – кінцевий час досліджень;

γ – коефіцієнт затухання хвилі.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХВИЛЬОВИХ ПРОЦЕСІВ У ТВЕРДИХ ТІЛАХ



ПРОГРАМНІ СЕРЕДОВИЩА МОДЕЛЮВАННЯ



ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ У ПЛАСТИНІ В РЕЗУЛЬТАТІ ПРОПУСКАННЯ ЗВУКУ

Приклад. Двовимірна математична модель

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}; (x, y) \in [0; 1]^2; t \in [0; 2].$$

Початкові умови мають вигляд: $U(x, y, 0) = U_t(x, y, 0) = 0$.

Граничні умови мають вигляд:

$$\left. \frac{\partial U}{\partial \vec{n}} \right|_{\Gamma} = 0 \text{ для } t > 0.$$

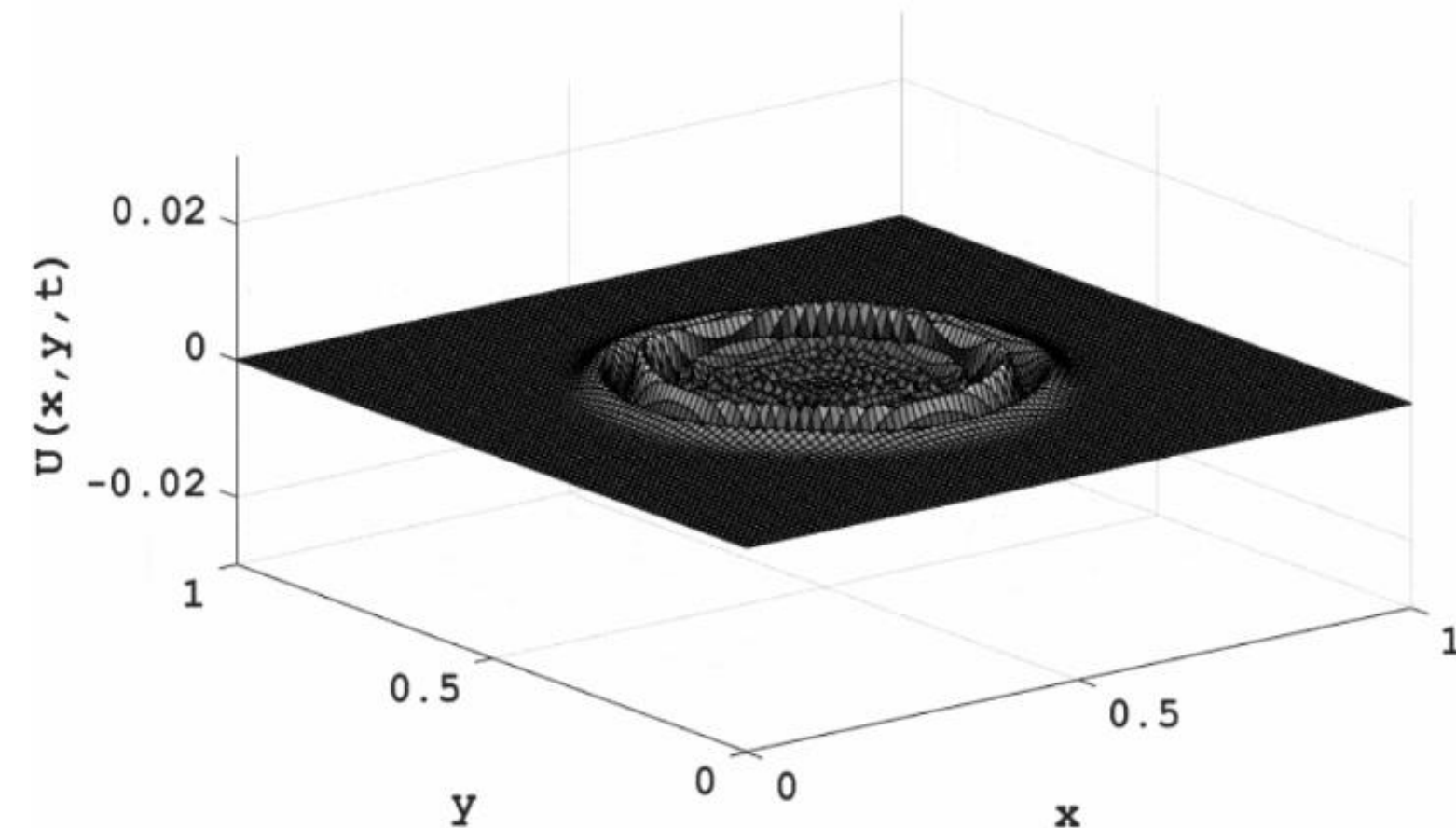
Внутрішня умова має вигляд:

$$U\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, t\right) = \frac{1}{30} \sin 18\pi t, 0 < t < 0,2.$$

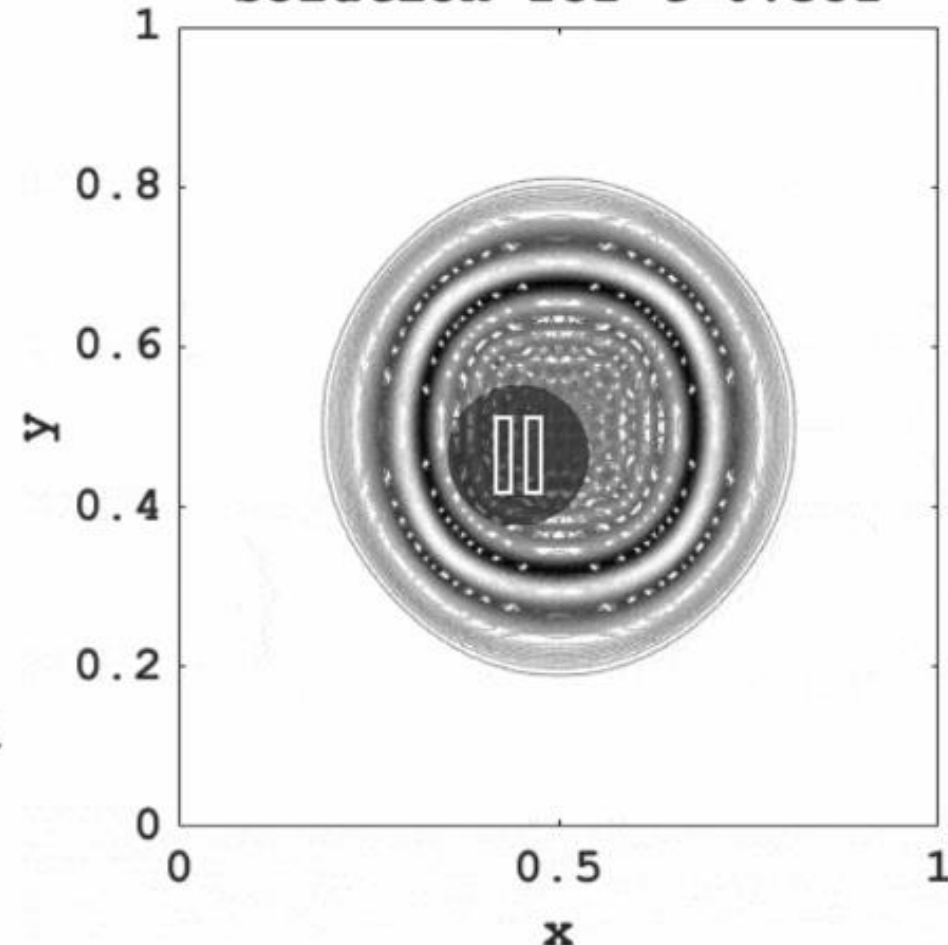
ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ У ПЛАСТИНІ В РЕЗУЛЬТАТІ ПРОПУСКАННЯ ЗВУКУ

Результати моделювання

Solution for $t=0.591$

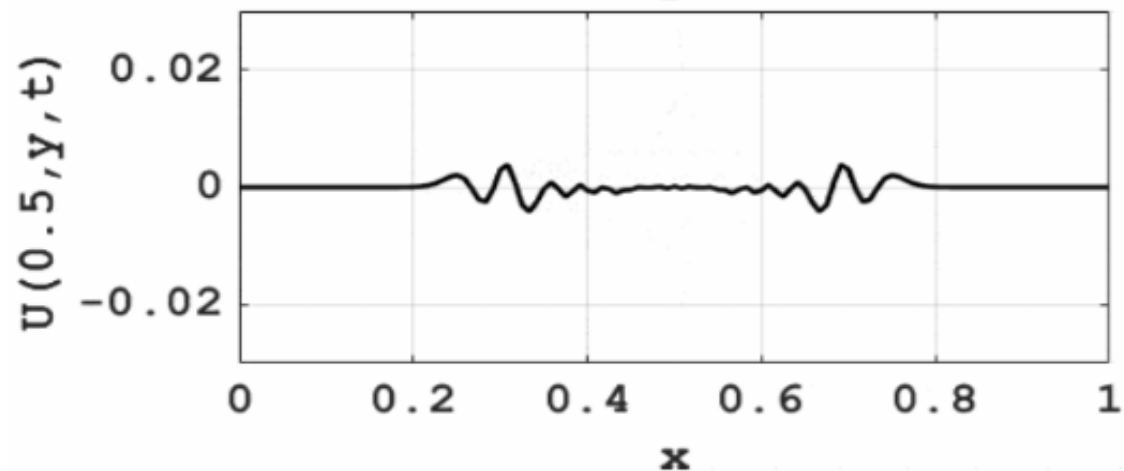


Solution for $t=0.581$

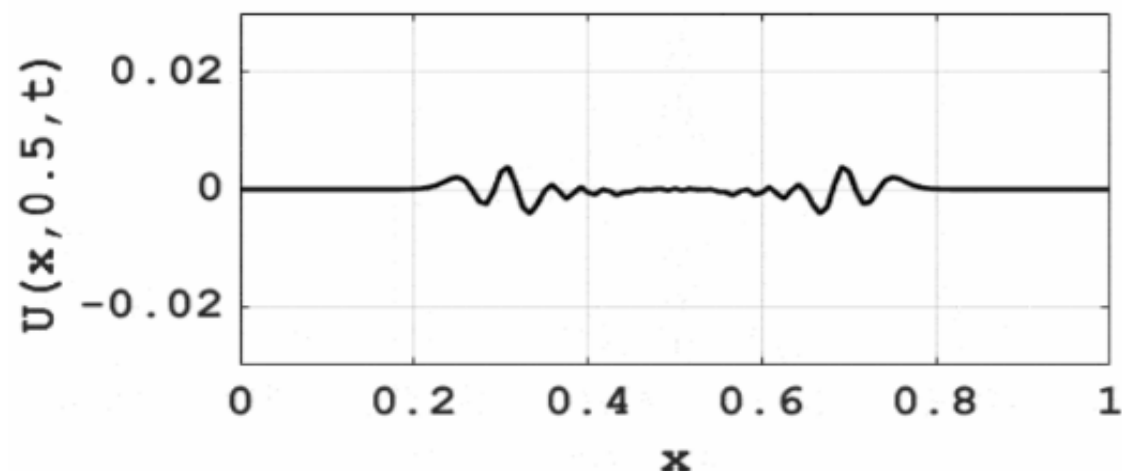


ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ У ПЛАСТИНІ В РЕЗУЛЬТАТІ ПРОПУСКАННЯ ЗВУКУ

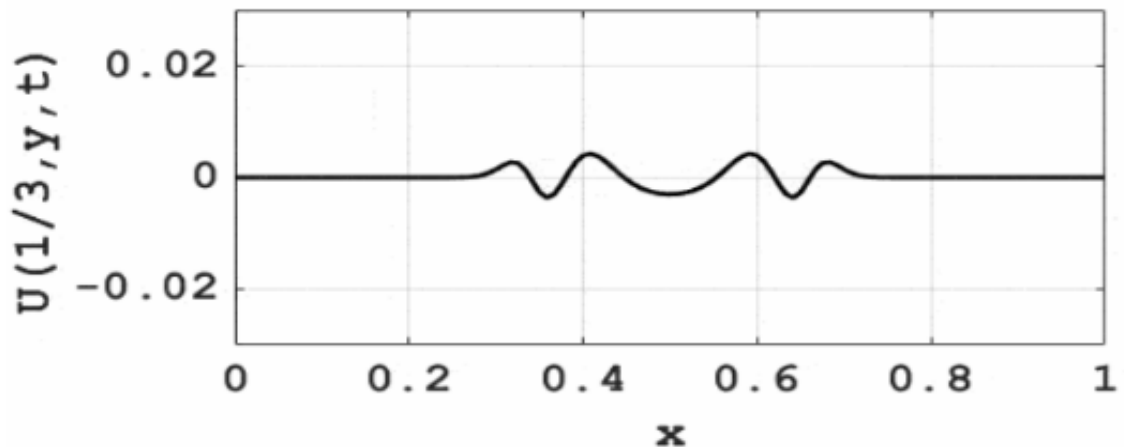
Solution $U(0.5;y;t)$ for $t=0.547$



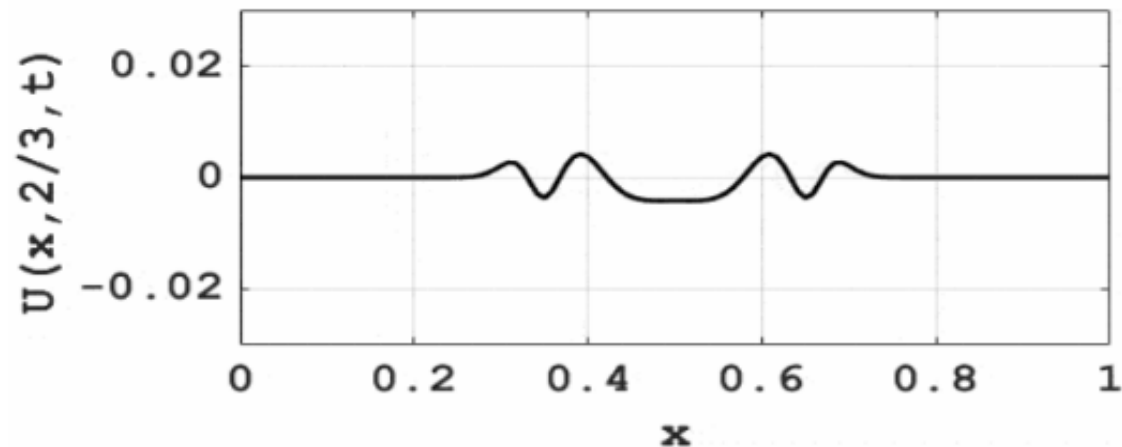
Solution $U(x;0.5;t)$ for $t=0.547$



Solution $U(1/3;y;t)$ for $t=0.547$



Solution $U(x;2/3;t)$ for $t=0.547$



МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ЗВУКОВИХ ХВИЛЬ ЧЕРЕЗ ДЕФЕКТИ

Загальна постановка завдання. Є тверда пластина з дефектом у вигляді тріщини (задається геометрично). Пластина має конкретні фізичні та геометричні характеристики. На пластині задано точкове джерело, що відтворює звукові хвилі (задана частота та амплітуда сигналу). Геометричне положення джерела відоме.

Основні завдання

- Провести розрахунок коливних процесів, яке здійснює джерело у пластині протягом конкретного проміжку часу;

МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ЗВУКОВИХ ХВИЛЬ ЧЕРЕЗ ДЕФЕКТИ

Основні завдання (продовження)

- отримати відгук сигналу джерела збуджень у конкретних областях пластини з плином часу;
- здійснити порівняння відгуків сигналу однакових за характеристиками пластин з дефектами та без них в конкретних їхніх областях;
- змінити положення дефектів (тріщин) пластини та провести чисельні експерименти повторно;
- зробити висновки до отриманих результатів моделювання.

МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ЗВУКОВИХ ХВИЛЬ ЧЕРЕЗ ДЕФЕКТИ

Математична постановка задачі.

$$\partial^2 U / \partial t^2 = \partial^2 U / \partial x^2 + \partial^2 U / \partial y^2 ;$$

$$(x, y) \in [-0,5; 0,5]^2; t \in [0; 1].$$

Початкові умови мають вигляд:

$$U(x, y, 0) = U_t(x, y, 0) = 0.$$

Граничні умови мають вигляд: $\partial U / \partial \bar{n}|_{\Gamma} = 0$.

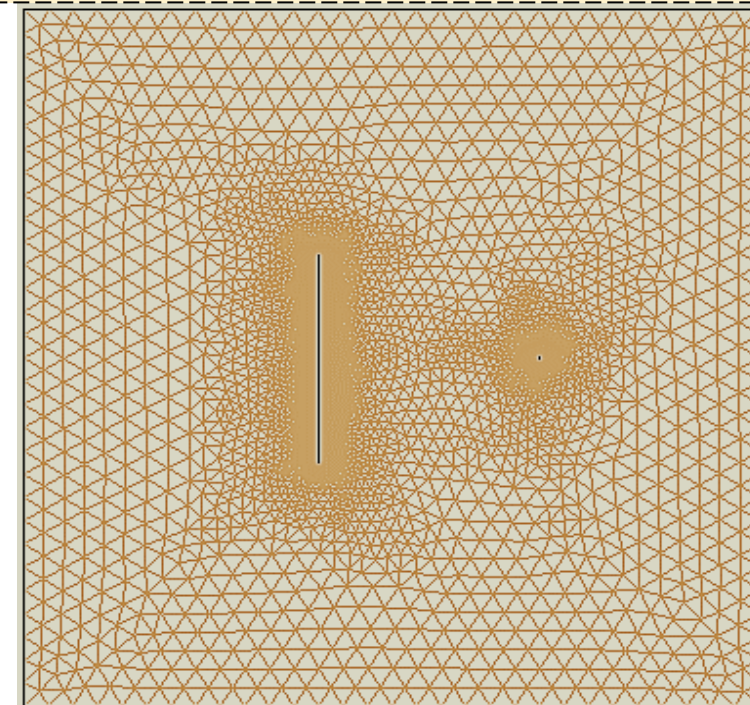
Внутрішня умова (на джерелі):

$$U(0,2; 0; t) = 30^{-1} \sin 16\pi t, t > 0.$$

Внутрішня умова (на границі Γ_2 тріщини G):

$$\left. \partial U / \partial \bar{n} \right|_{\Gamma_2} = 0,$$

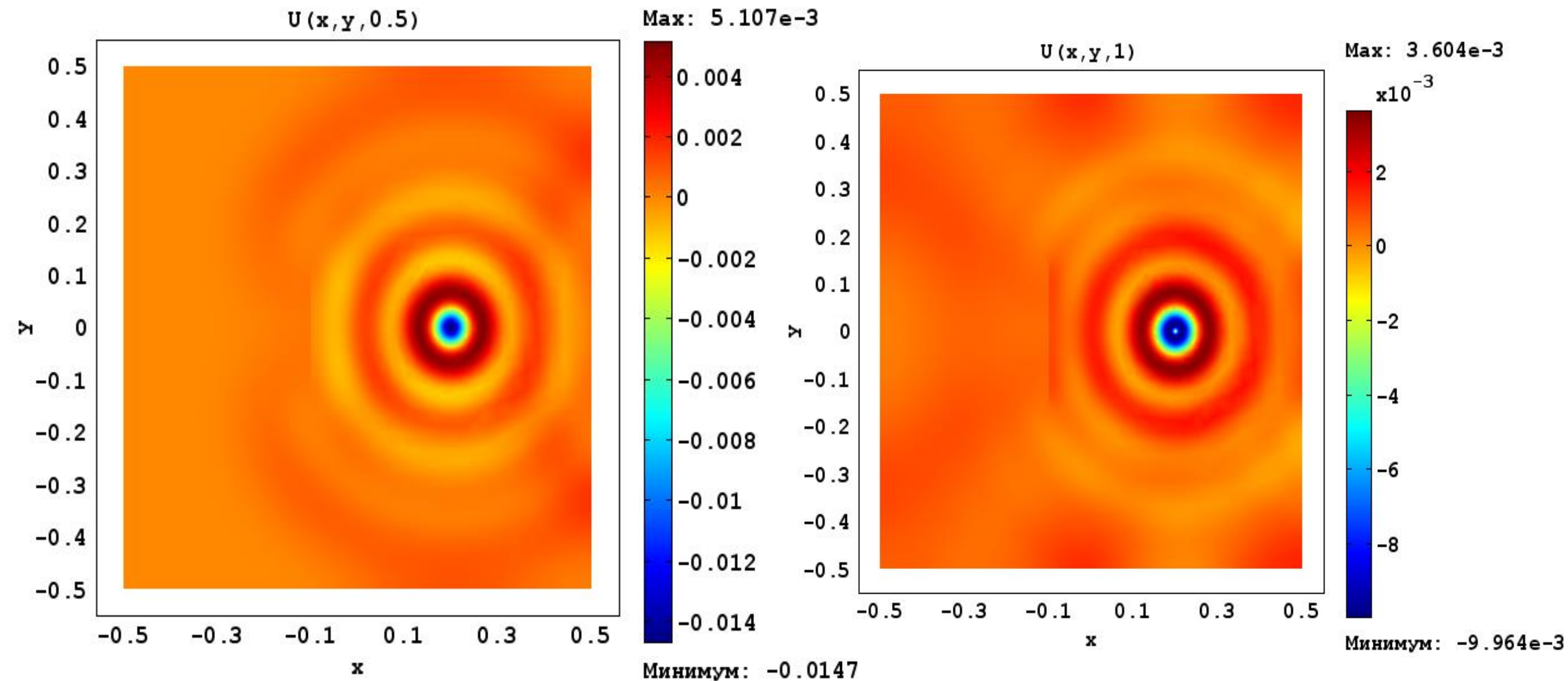
$$G = [-0,5 \cdot 10^{-3}; 0,5 \cdot 10^{-3}] \times [-0,15; 0,15].$$



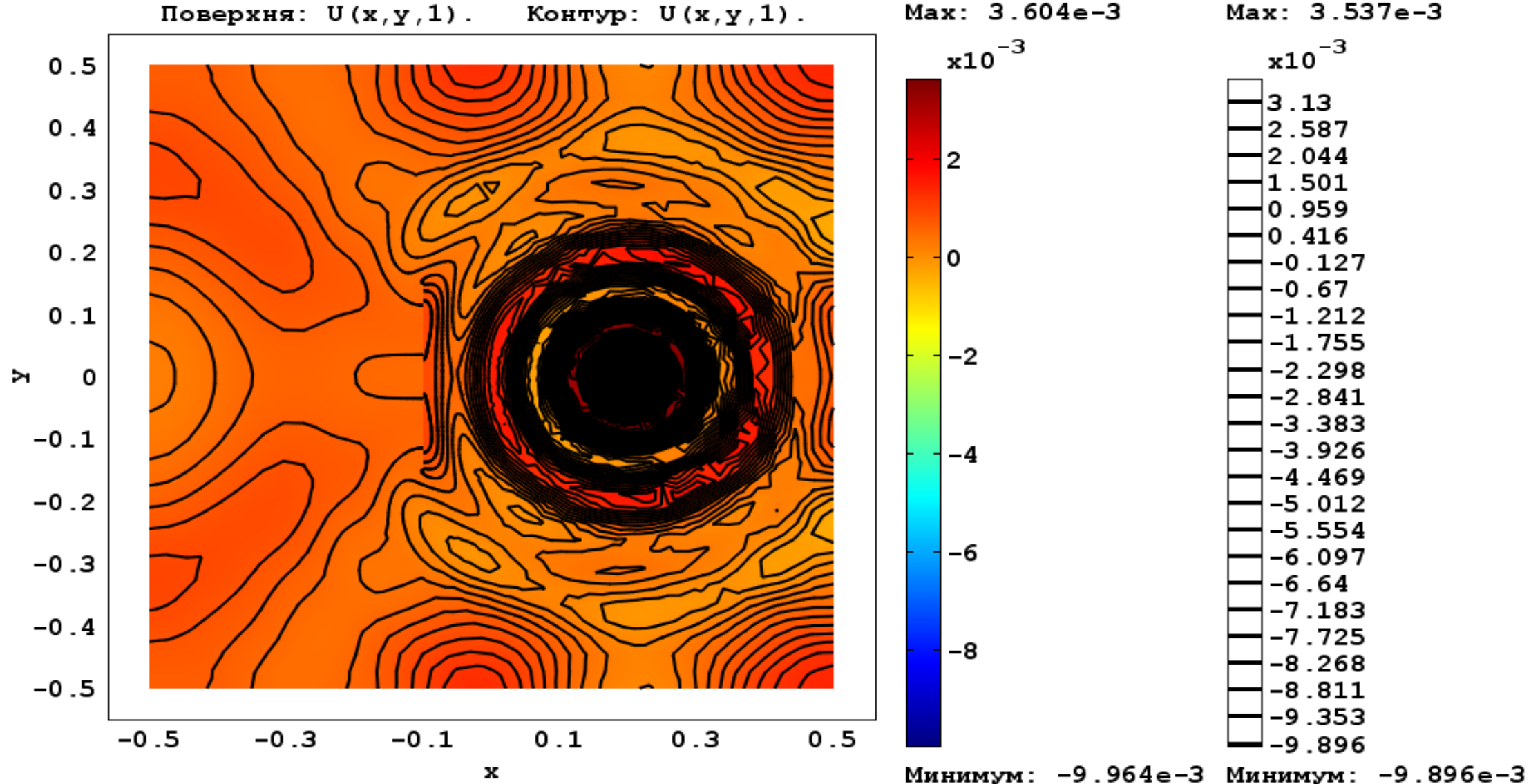
Основні характеристики
розрахункової сітки

Кількість елементів	17897
Кількість вузлів сітки	35672
Кількість граничних елементів	1032

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

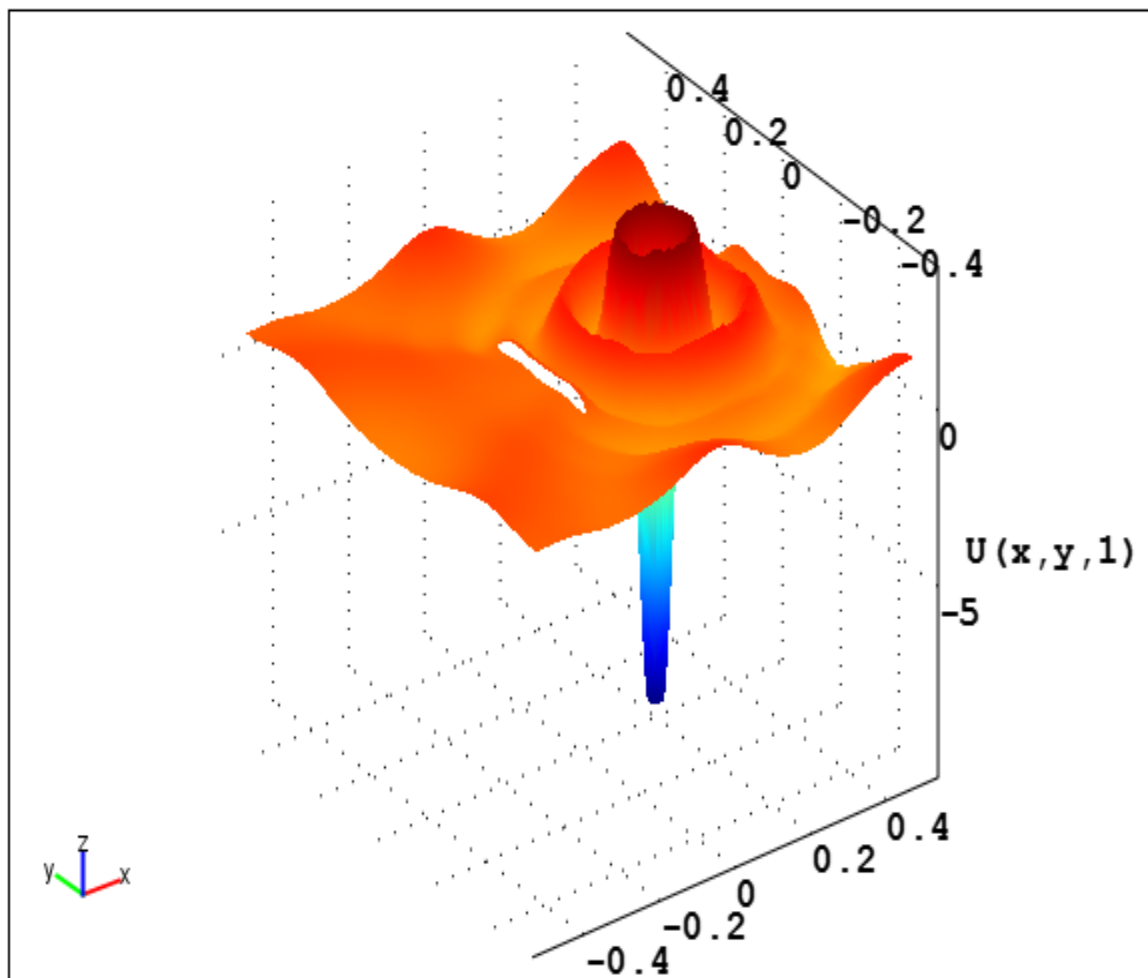


ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

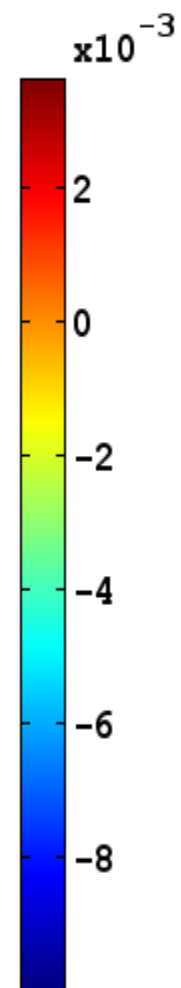


ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

Поверхня: $U(x, y, 1)$

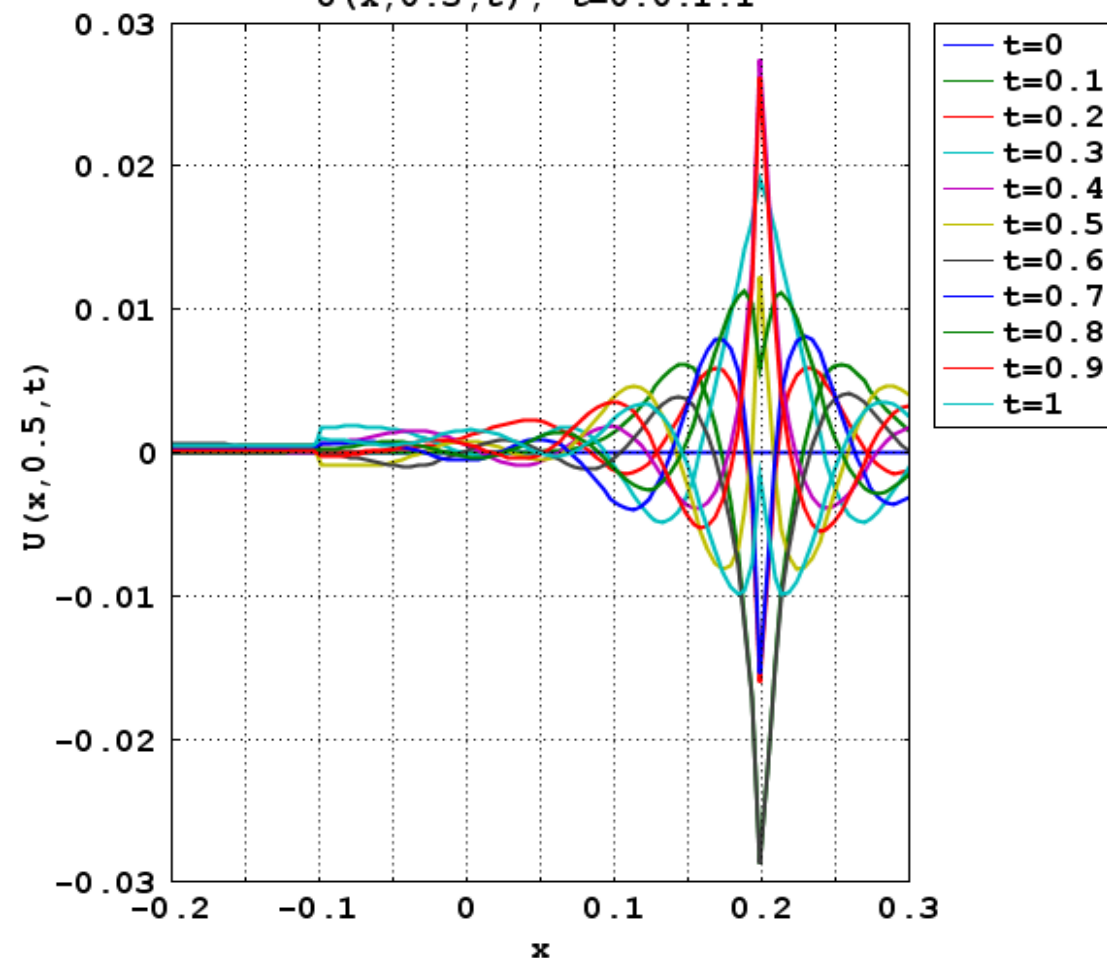


Мак: $3.604e-3$

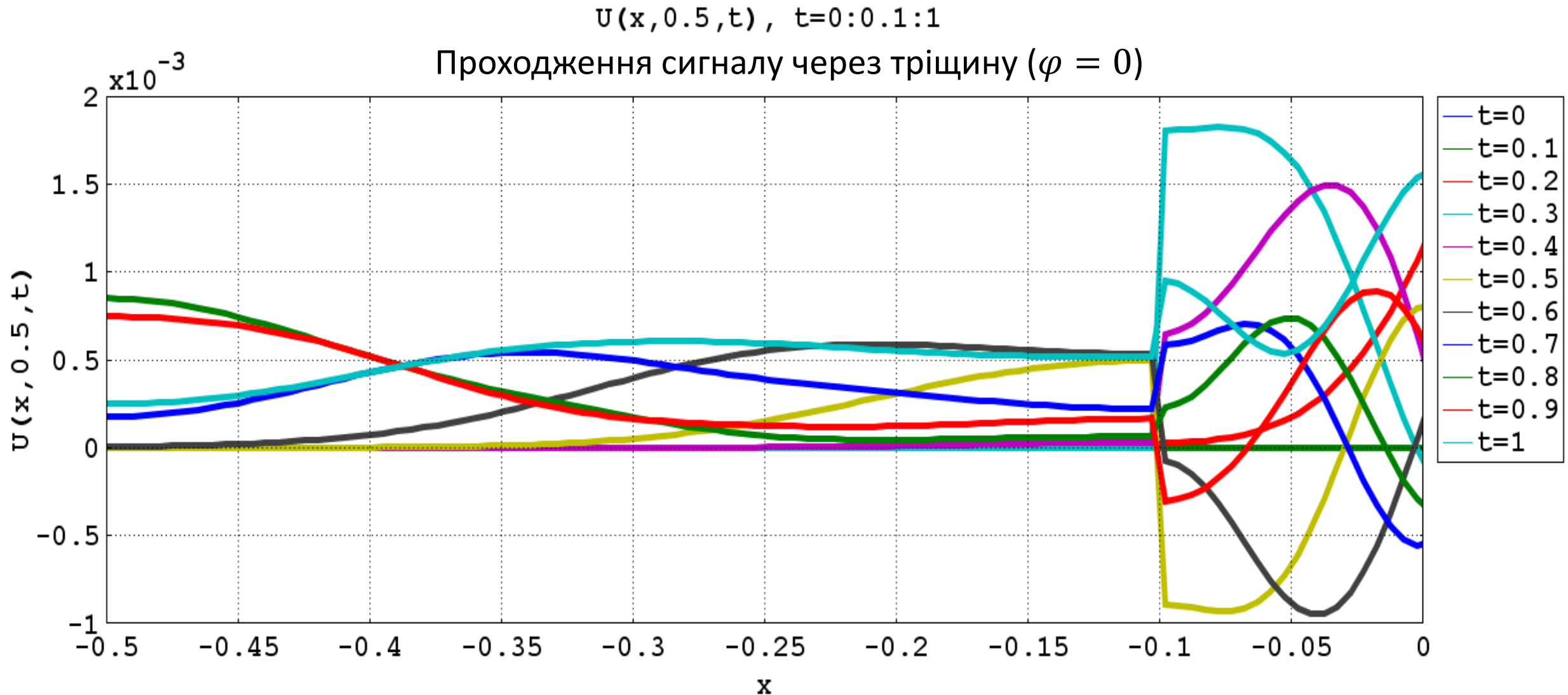


Минимум: $-9.964e-3$

$U(x, 0.5, t)$, $t=0:0.1:1$



ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ



МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ЗВУКОВИХ ХВИЛЬ ЧЕРЕЗ ДЕФЕКТИ

Математична постановка задачі.

$$\partial^2 U / \partial t^2 = \partial^2 U / \partial x^2 + \partial^2 U / \partial y^2 ;$$

$$(x, y) \in [-0,5; 0,5]^2; t \in [0; 1].$$

Початкові умови: $U(x, y, 0) = U_t(x, y, 0) = 0$.

Граничні умови: $\partial U / \partial \bar{n}|_{\Gamma} = 0$.

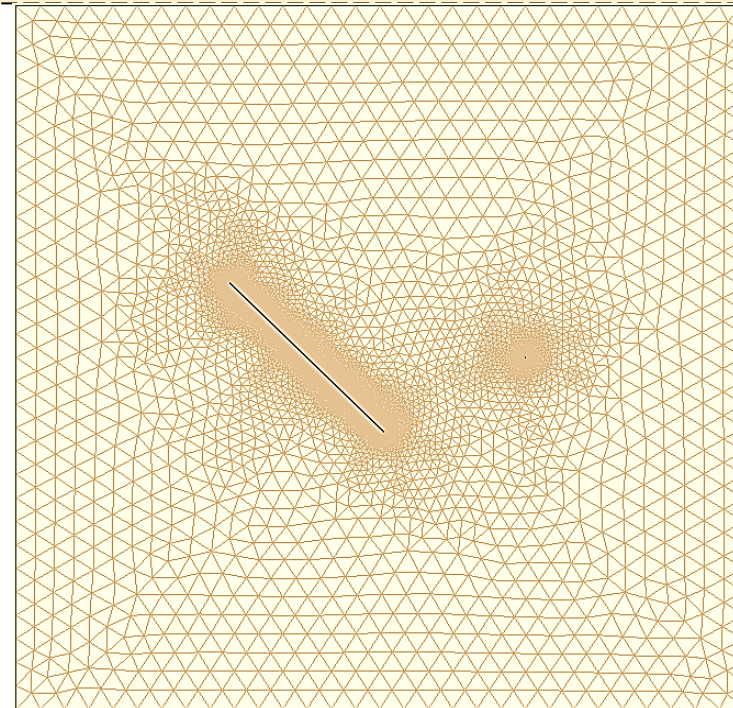
Внутрішня умова (на джерелі):

$$U(0,2; 0; t) = 30^{-1} \sin 16\pi t, t > 0.$$

Внутрішня умова (на границі Γ_2 тріщини G):

$$G = \left\{ \begin{array}{l} (x_s; y_s) | (x_s; y_s) = (x; y) \cdot M, \\ x \in [-0,5 \cdot 10^{-3}; 0,5 \cdot 10^{-3}], \\ y \in [-0,15; 0,15], M = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}, \varphi = \frac{\pi}{4} \end{array} \right\},$$

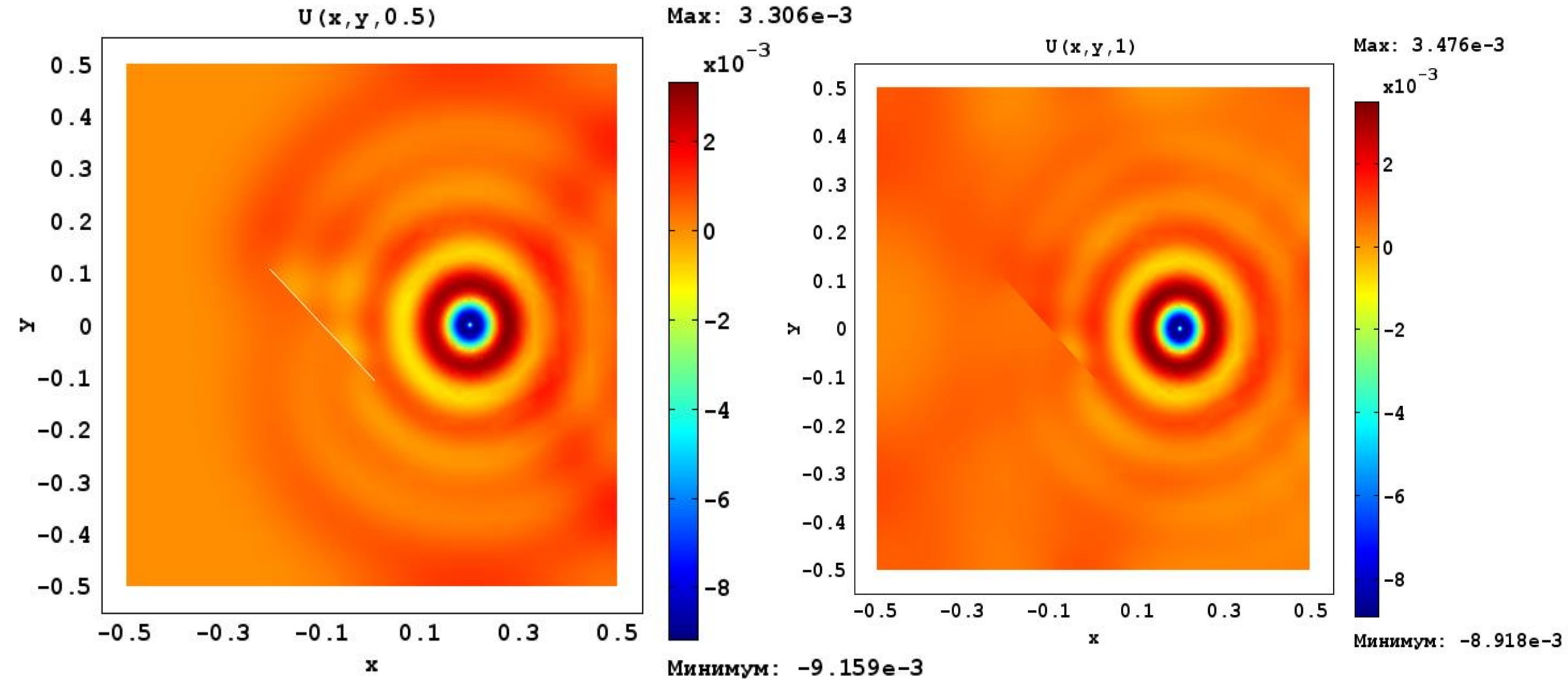
$$\partial U / \partial \bar{n}|_{\Gamma_2} = 0,$$



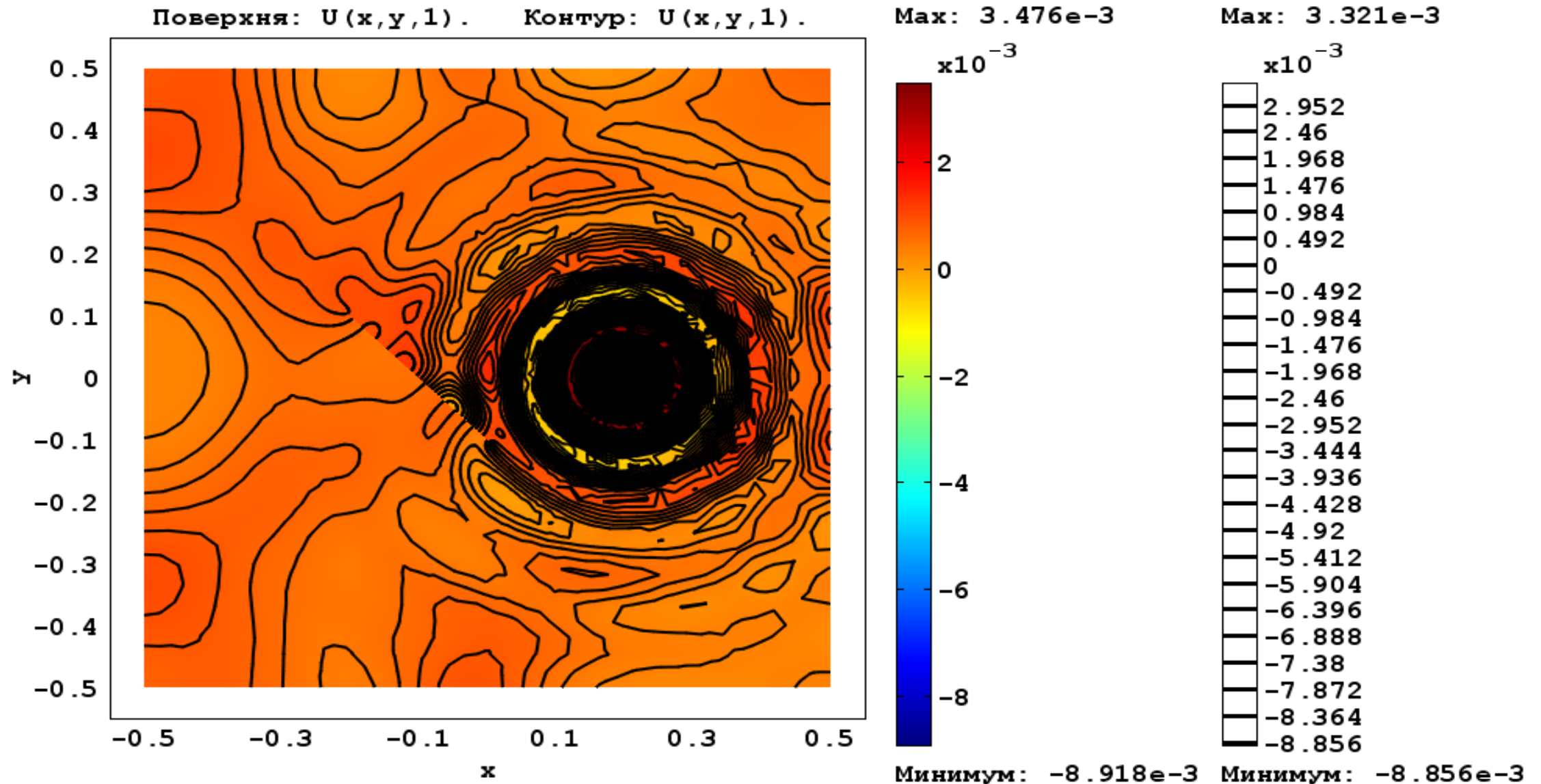
Основні характеристики
розрахункової сітки

Кількість елементів	19546
Кількість вузлів сітки	38674
Кількість граничних елементів	1034

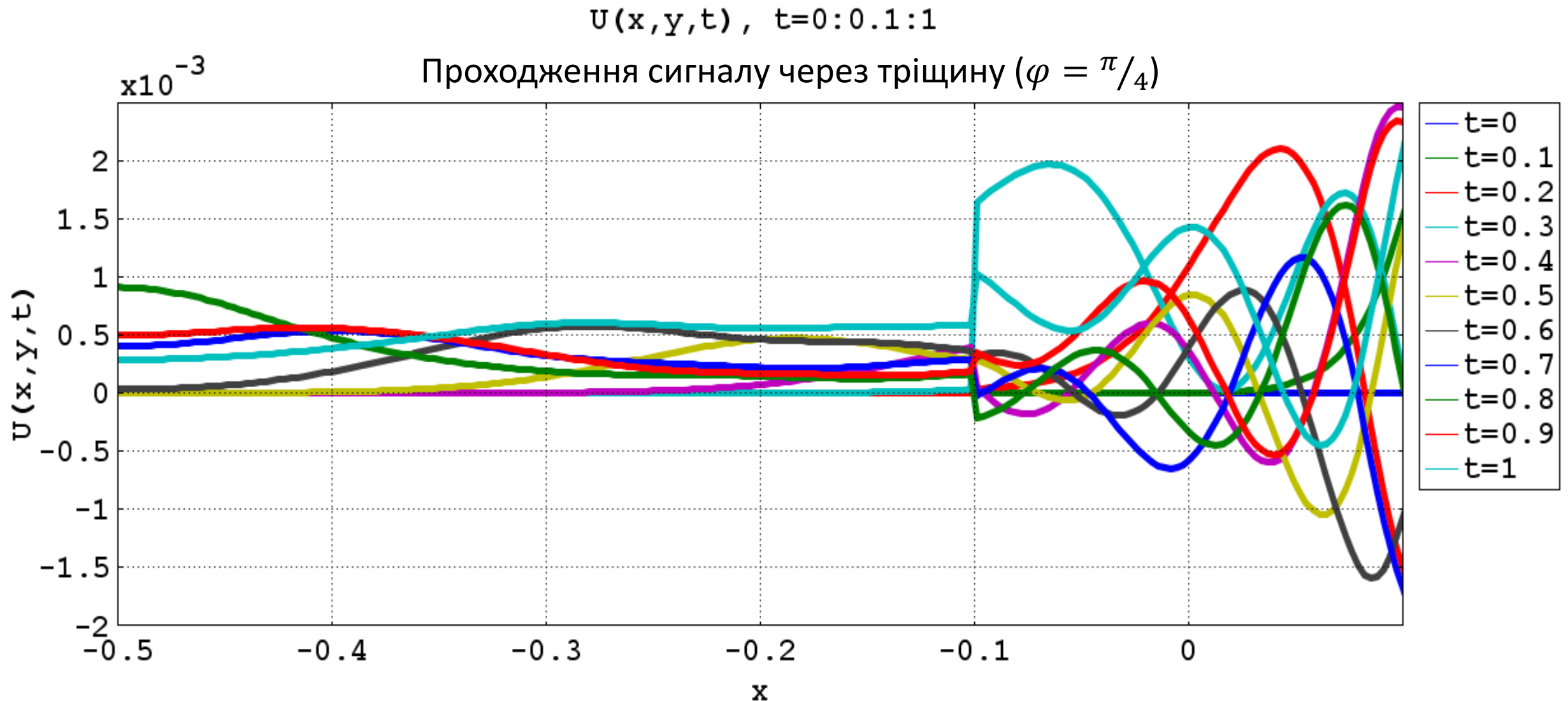
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ



ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ



ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

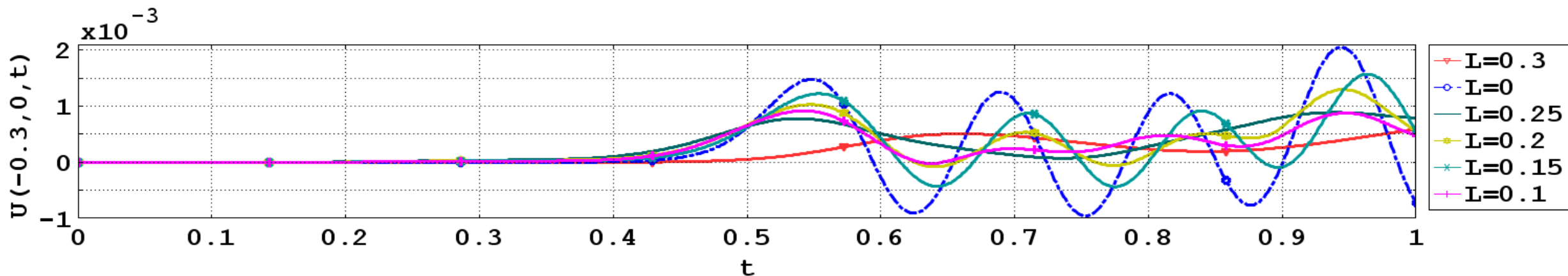


ПОШИРЕННЯ СИГНАЛУ ЧЕРЕЗ ТІЛА БЕЗ ДЕФЕКТІВ ТА ЧЕРЕЗ ТІЛА З ДЕФЕКТАМИ

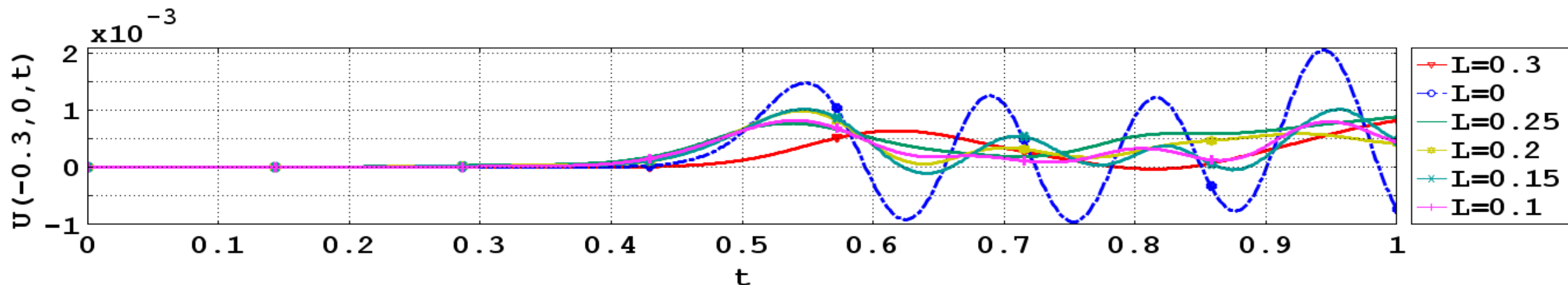


ПОШИРЕННЯ СИГНАЛУ ЧЕРЕЗ ТІЛА БЕЗ ДЕФЕКТІВ ТА ЧЕРЕЗ ТІЛА З ДЕФЕКТАМИ

$U(-0.3, 0, t) \cdot f_i=0$



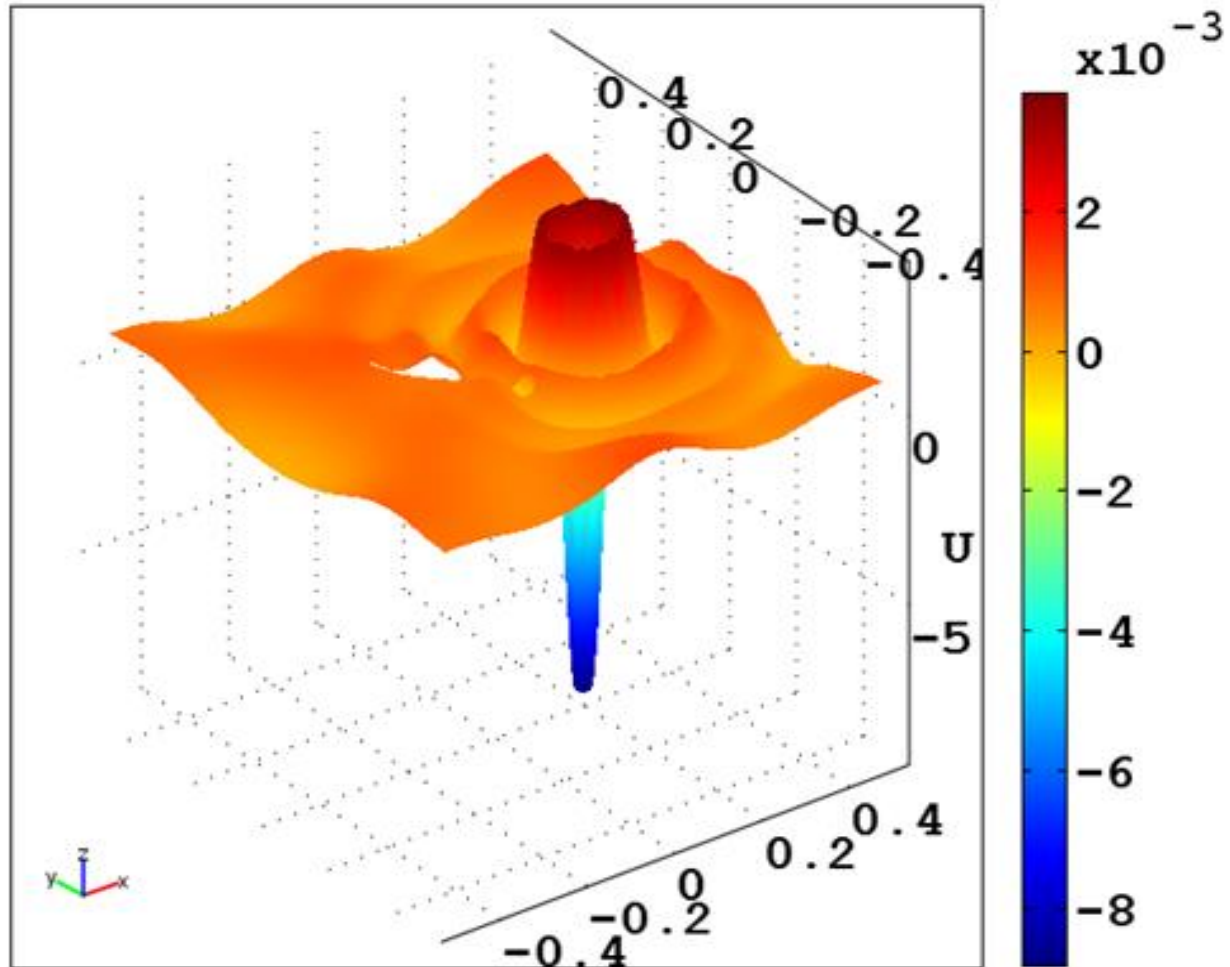
$U(-0.3, 0, t) \cdot f_i=\pi/4$



ПОРІВНЯННЯ ПРОЦЕСІВ ПОШИРЕННЯ СИГНАЛУ ЧЕРЕЗ ЦІЛІ ТІЛА ТА ТІЛА З ДЕФЕКТАМИ

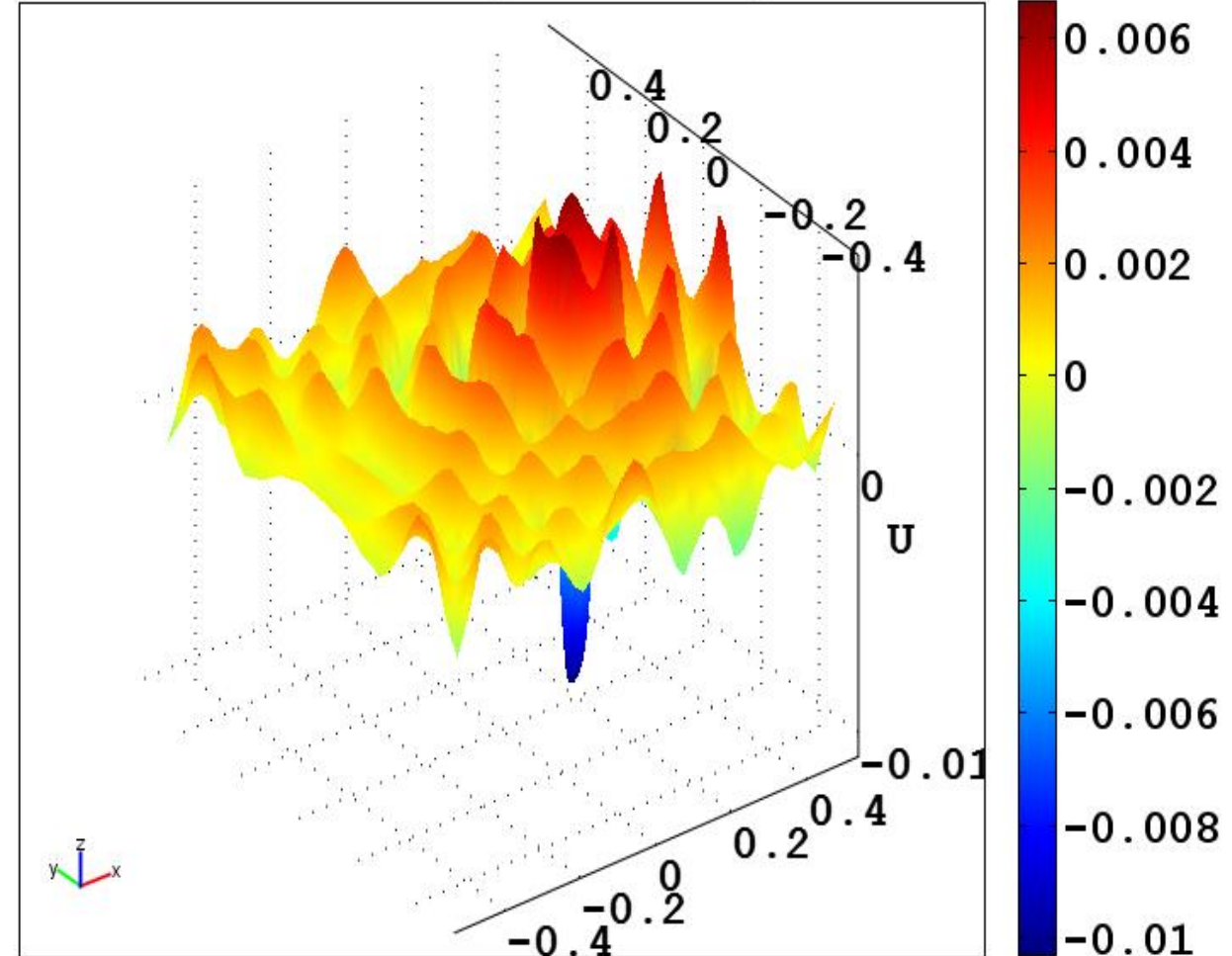
Time=1

Поверхня: $U(x, y, 1)$



Time=1

Поверхня: $U(x, y, 1)$



МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ХВИЛЬОВИХ ПРОЦЕСІВ У ТВЕРДИХ ТІЛАХ

- **Модель визначення характеристик сигналу джерела у твердих тілах.** Модель полягає у визначенні основних характеристик (амплітуди та частоти) звукового сигналу, що знаходиться у заданій геометричній позиції за відомими значеннями на сенсорах протягом конкретного проміжку часу. Для кожного сенсора цей проміжок може бути різний.
- **Модель визначення геометричного положення сигналу джерела у твердих тілах.** Модель полягає у знаходженні координат джерела звуку при відомих його характеристиках (амплітуді та частоті) за відомими значеннями на сенсорах протягом конкретного проміжку часу. Для кожного сенсора цей проміжок може бути різний.

МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ХВИЛЬОВИХ ПРОЦЕСІВ У ТВЕРДИХ ТІЛАХ

- **Модель визначення швидкості поширення сигналу джерела у твердих тілах.** Модель полягає у визначенні швидкості поширення звуку в твердому середовищі за відомими характеристиками звукового сигналу (амплітуда та частота), що знаходиться у заданій геометричній позиції та за відомими показниками сенсорів протягом конкретного проміжку часу. Для кожного сенсора цей проміжок може бути різний.

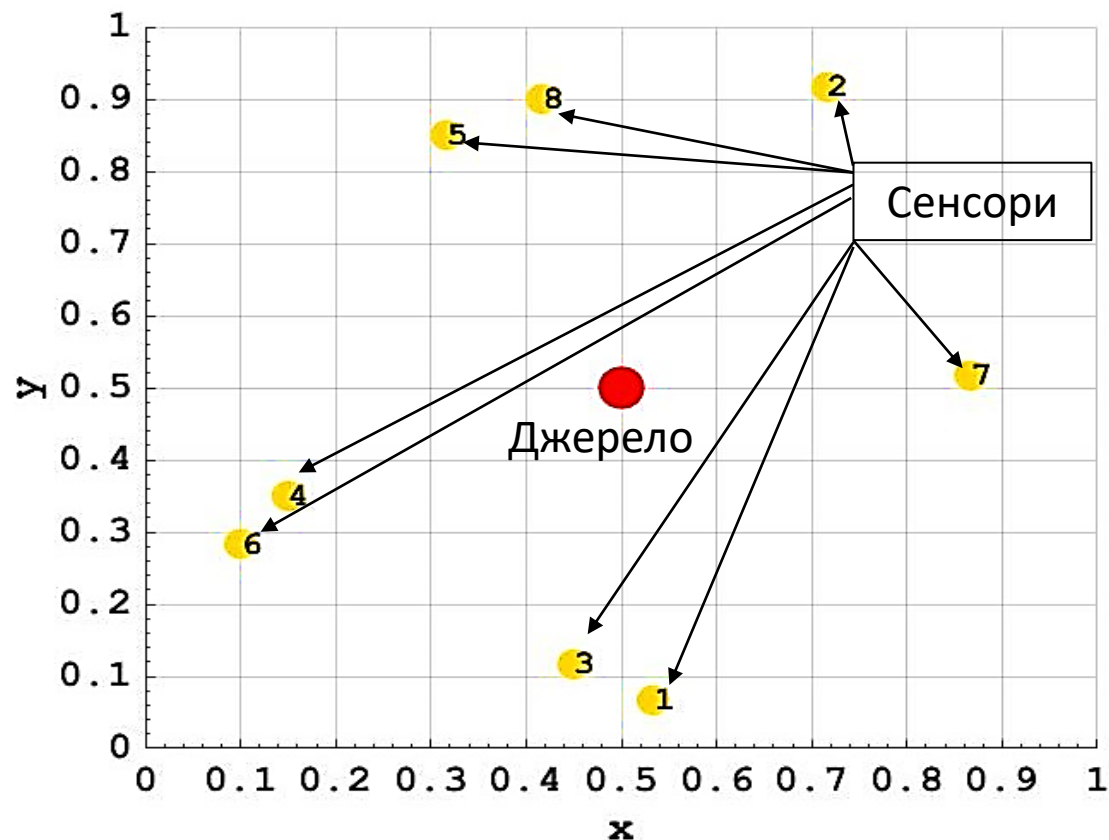
МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛУ ДЖЕРЕЛА У ТВЕРДИХ ТІЛАХ

Постановка завдання. Є пластина, фізичні та геометричні характеристики якої відомі. У пластині коливні процеси здійснює точкове джерело, характеристики якого (амплітуда та частота) невідомі. Геометричне положення джерел відоме (задається координатами). У деяких фіксованих точках (задаються координатами) є сенсори, які отримують відгуки сигналу, що здійснюється джерелом.

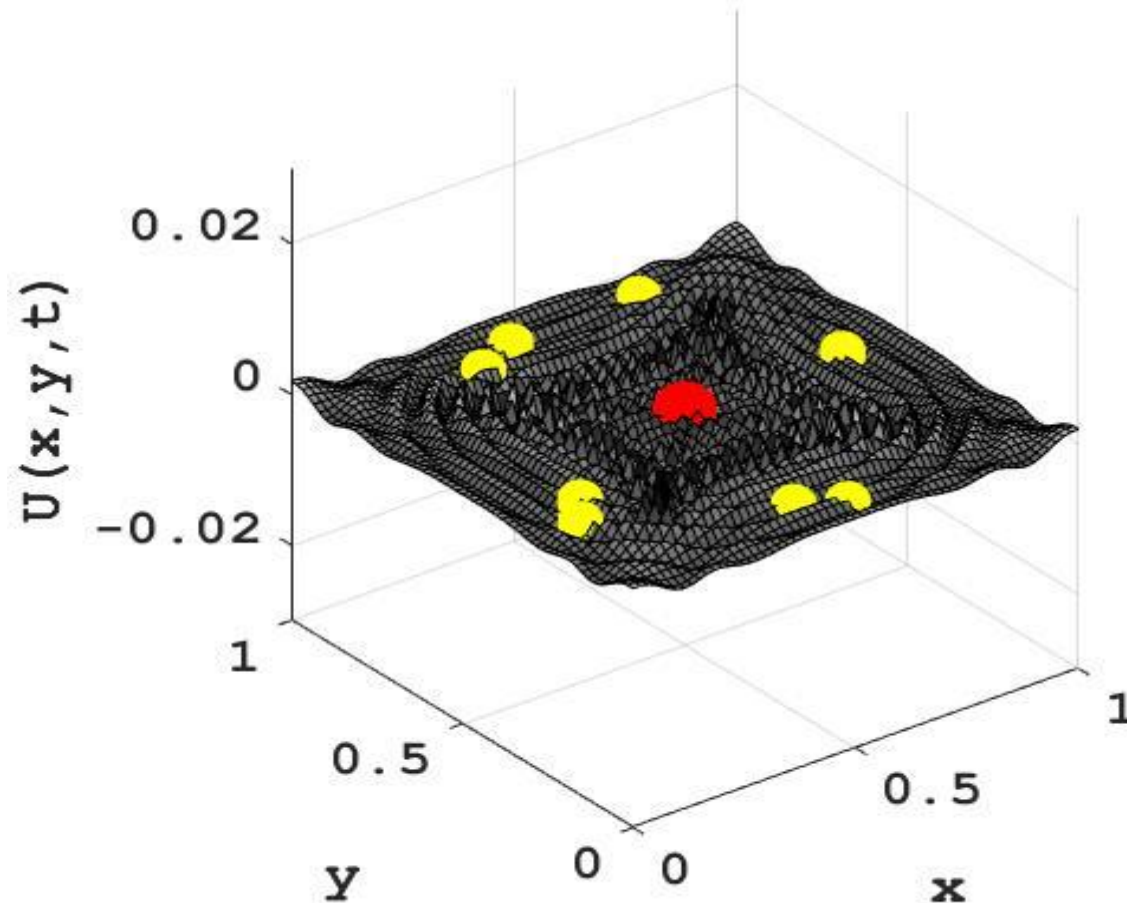
Необхідно визначити характеристики (амплітуду та частоту) джерела за відомими показниками сенсорів, які отримують дані протягом конкретного проміжку часу.

МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛУ ДЖЕРЕЛА У ТВЕРДИХ ТІЛАХ

Геометрія області з джерелом та сенсорами.



Solution for $t=1.45$



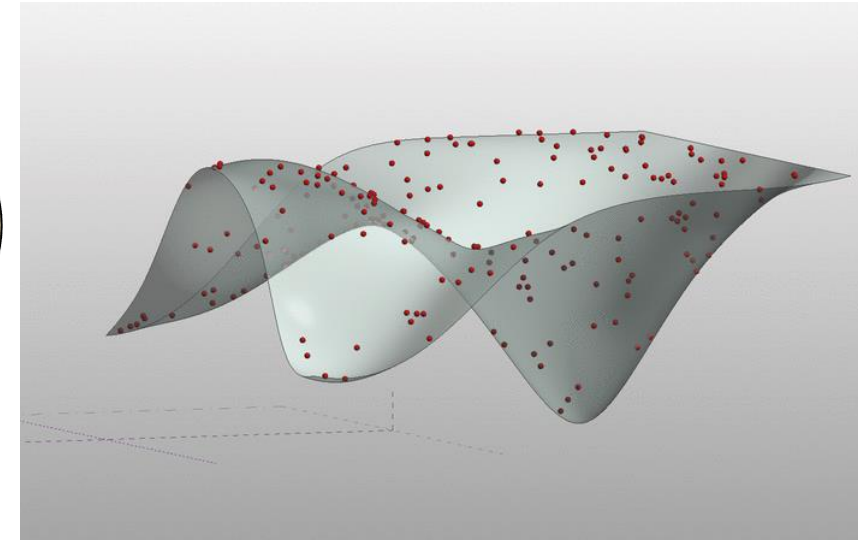
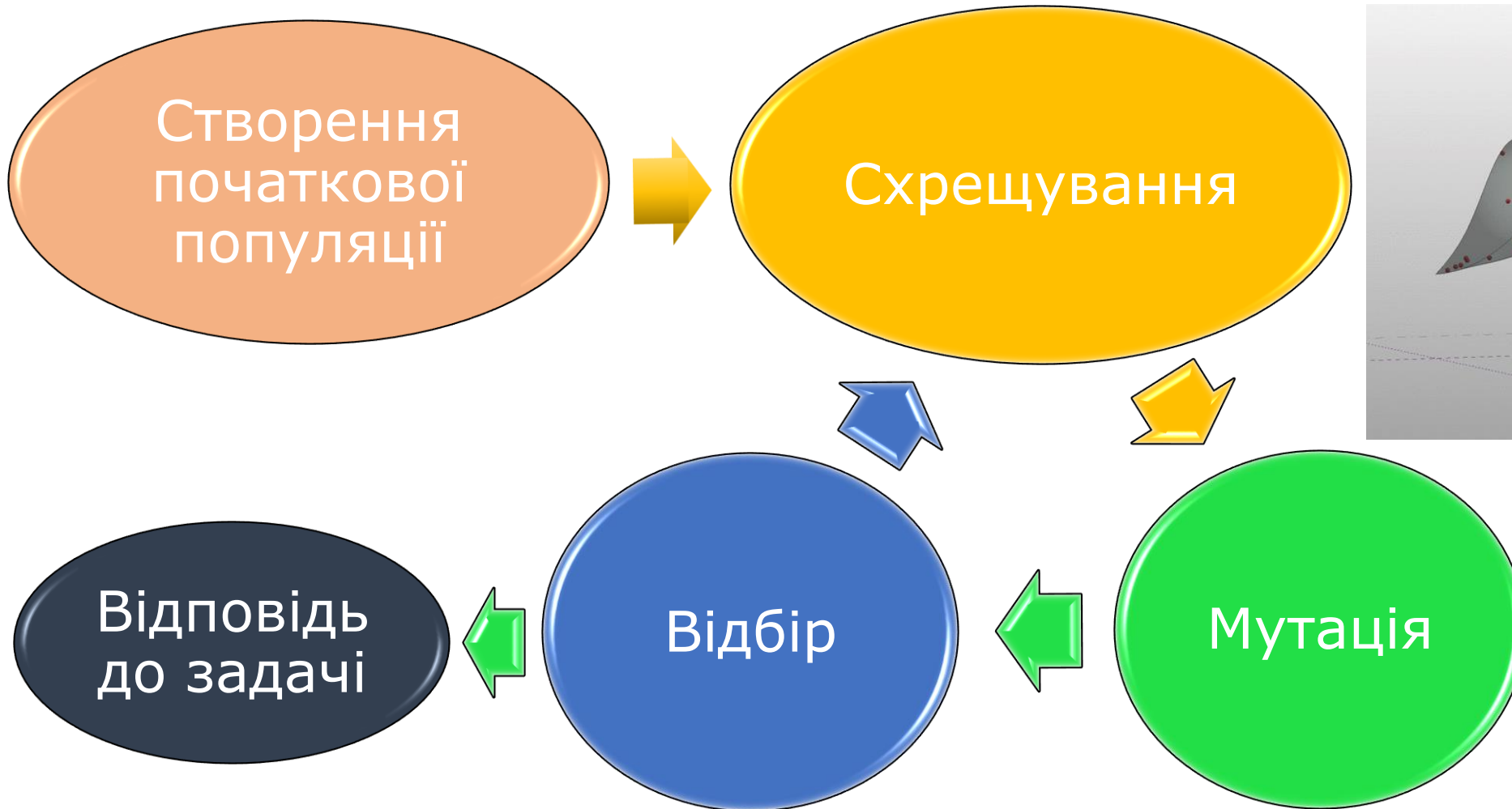
МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛУ ДЖЕРЕЛА У ТВЕРДИХ ТІЛАХ

$$F(A, f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \int_{\tau_i^{beg}}^{\tau_i^{end}} \left(s_i(A, f, t) - s_i^{experimental}(t) \right)^2 dt \rightarrow \min,$$

Основні позначення математичної моделі:

$s_i(A, f, t) = U(A, f, x_i^{sensor}, y_i^{sensor}, t);$	n	– загальна кількість сенсорів;
$0 \leq \tau_i^{beg} < \tau_i^{end} \leq T, i = \overline{1, n};$	τ_i^{beg}	– час початку спостереження на i -му сенсорі;
$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}$ для $\Omega, t \in [0; T];$	τ_i^{end}	– час закінчення спостереження на i -му сенсорі;
$\Omega = (x, y) \in [a; b] \times [c; d], a, b, c, d \in \mathbb{R};$	$s_i^{experimental}(t)$	– зняті дані i -им сенсором протягом певного проміжку часу $[\tau_i^{beg}; \tau_i^{end}]$;
$U(x, y, 0) = U_t(x, y, 0) = 0.$	T	– загальний час проведення експерименту.
$\partial U / \partial \bar{n} \Big _{\Gamma} = 0, t \in [0; T];$	Ω	– розрахункова область задачі (досліджуваний об'єкт);
$U(A, f, x^{source}, y^{source}, t) = A \sin 2\pi f t.$	A	– амплітуда;
	f	– частота;
	$(x_i^{sensor}, y_i^{sensor})$	– положення i -го сенсора;
	(x^{source}, y^{source})	– положення збудника коливань.

РЕАЛІЗАЦІЯ ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ГЕНЕТИЧНИМ АЛГОРИТМОМ



ДАНІ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ПРИ ЗНАХОДЖЕННІ РОЗВ'ЯЗКУ МОДЕЛІ

$$F(A, f) = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \int_0^{1,5} \left(s_i(A, f, t) - s_i^{experimental}(t) \right)^2 dt \rightarrow \min,$$

$$\left\{ \begin{array}{l} s_i(A, f, t) = U(A, f, x_i^{sensor}, y_i^{sensor}, t); \\ \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \text{ для } \Omega, t \in [0; 1,5]; \\ \Omega = (x, y) \in [0; 1]^2, i = \overline{1,8}; \\ U(x, y, 0) = U_t(x, y, 0) = 0. \\ \left. \frac{\partial U}{\partial \vec{n}} \right|_{\Gamma} = 0, t \in [0; 1,5]; \\ U(A, f, x^{source}, y^{source}, t) = A \sin 2\pi f t. \end{array} \right.$$

Розрахункова сітка 60х60 (МКР) .

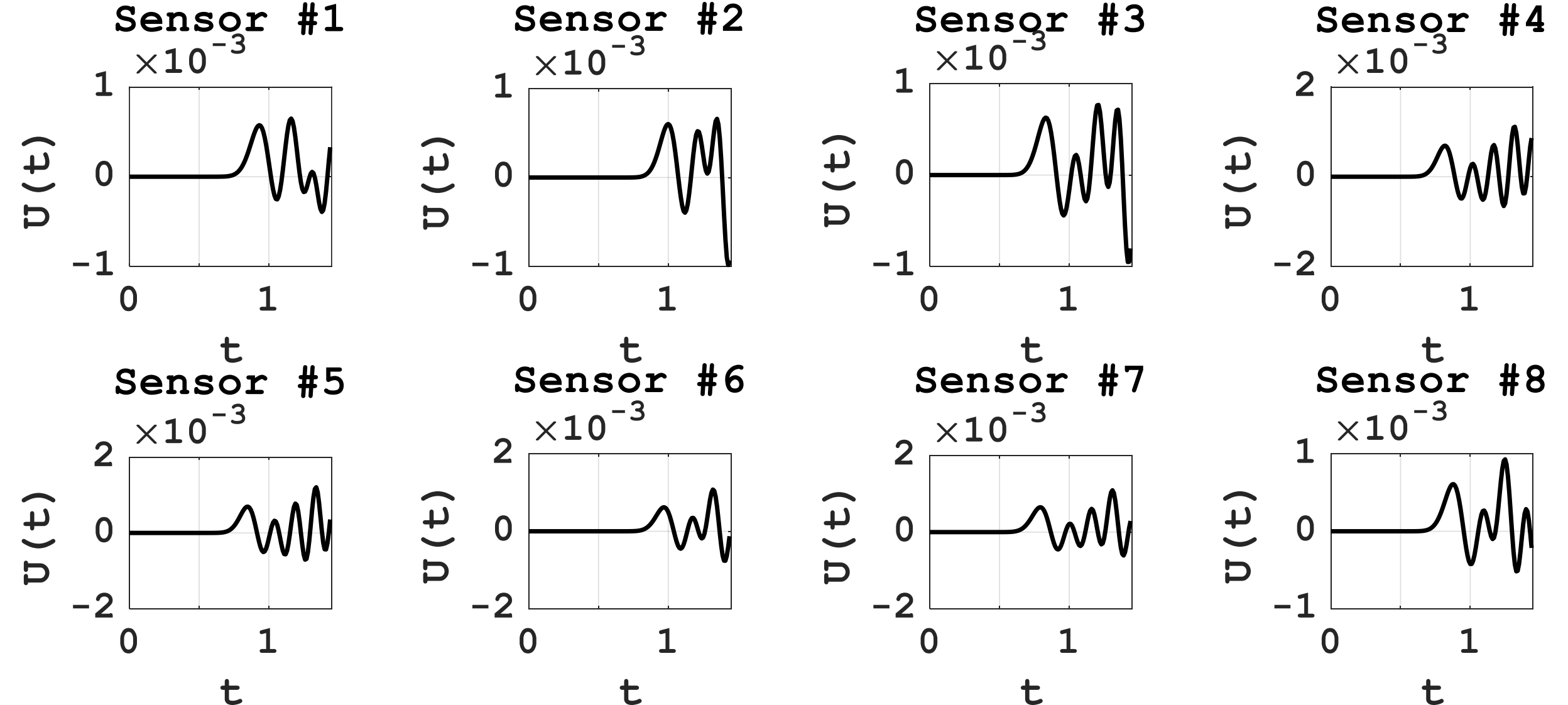
w = 32 - кількість біт для кодування.

Положення джерела: (0,5;0,5) .

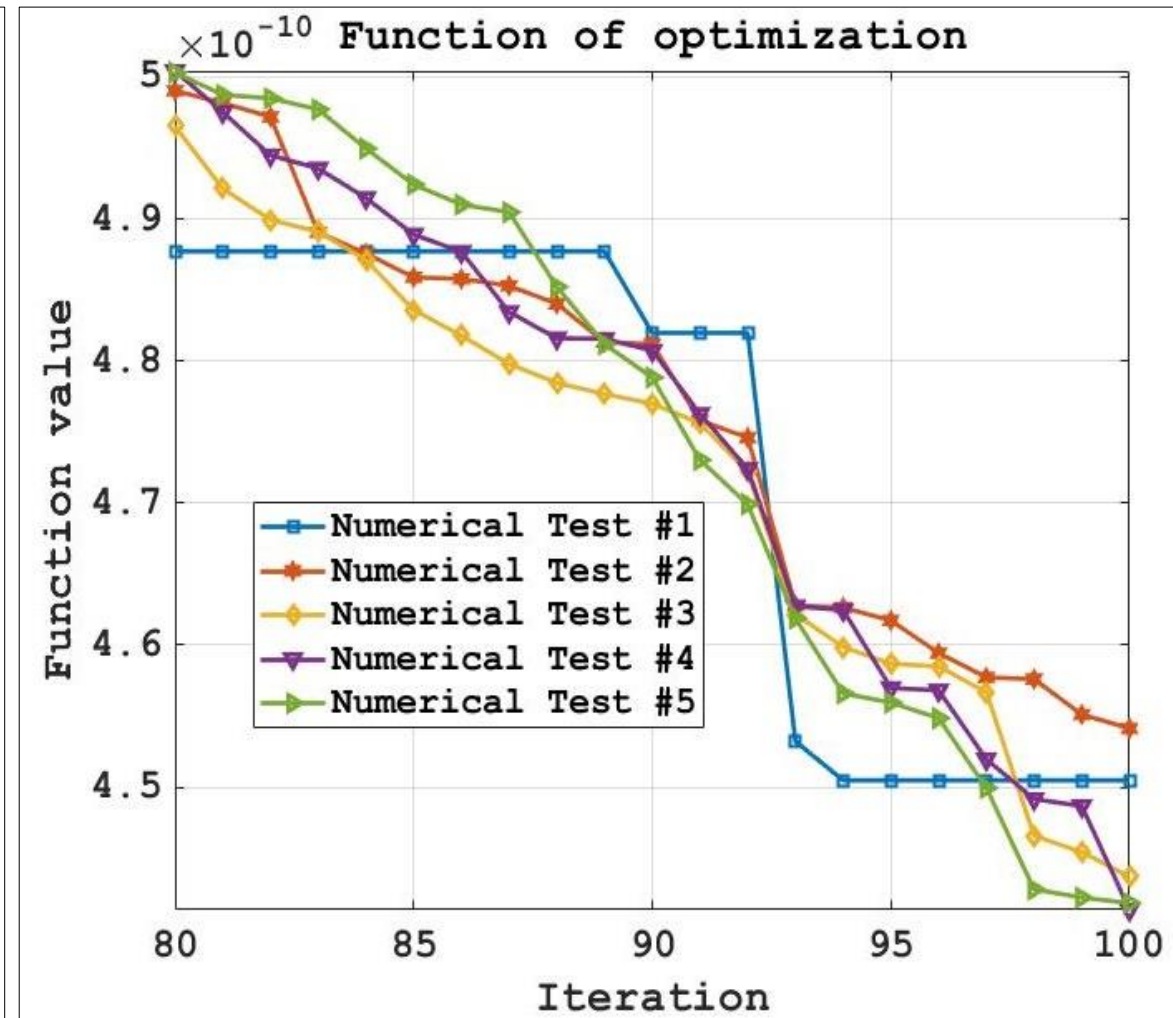
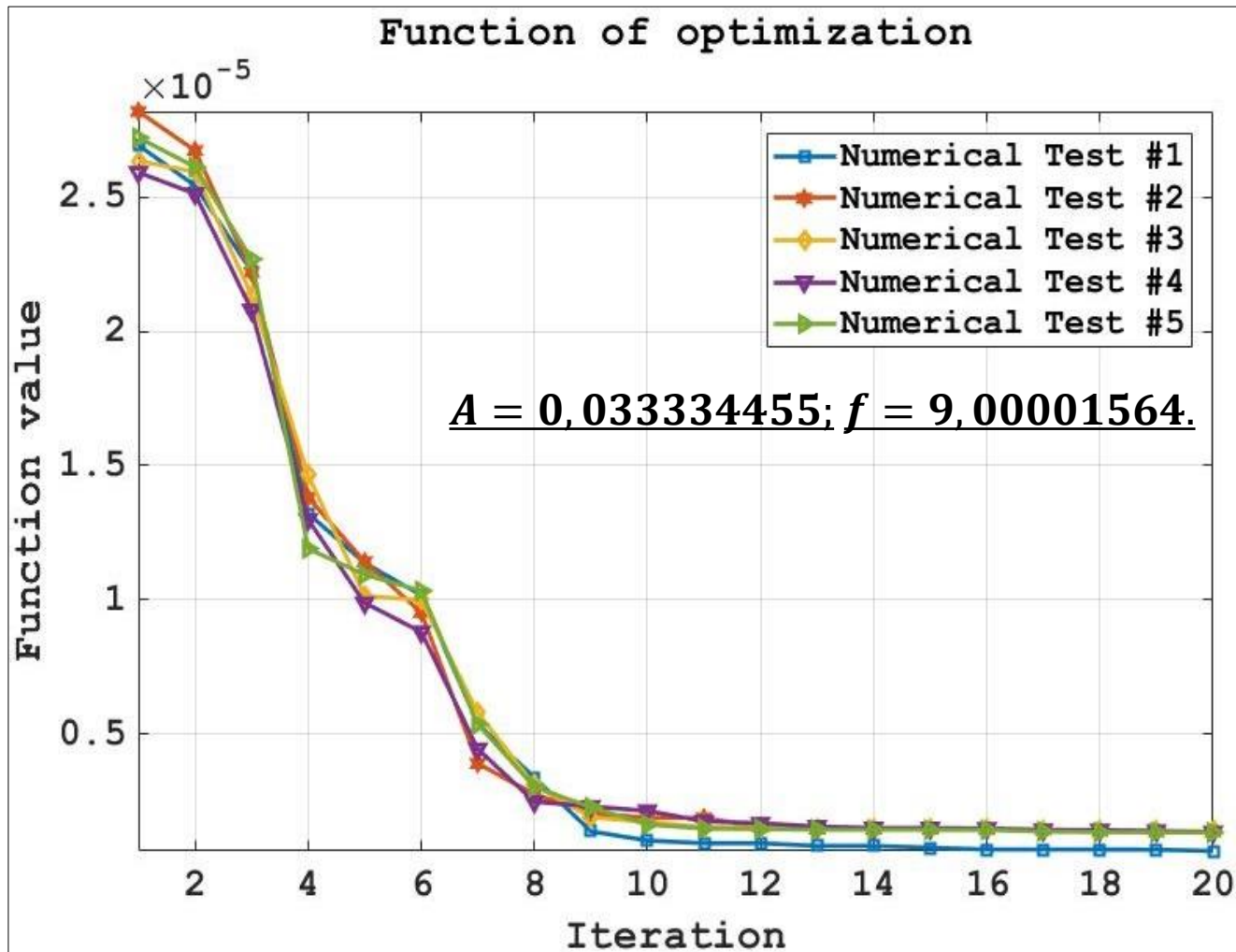
Положення сенсорів:

х	у
0.5333	0.0667
0.7167	0.9167
0.4500	0.1167
0.1500	0.3500
0.3167	0.8500
0.1000	0.2833
0.8667	0.5167
0.4167	0.9000

ЗЧИТАНІ ДАНІ СЕНСОРАМИ



ЗБІЖНІСТЬ ОБРАНОГО МЕТОДУ ОПТИМІЗАЦІЇ ЗА ЗНАЧЕННЯМ ЦІЛЬОВОГО ФУНКЦІОНАЛА



МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ СИГНАЛУ ДЖЕРЕЛА У ТВЕРДИХ ТІЛАХ

$$F(x^{source}, y^{source}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \int_{\tau_i^{beg}}^{\tau_i^{end}} \left(s_i(x^{source}, y^{source}, t) - s_i^{experimental}(t) \right)^2 dt \rightarrow \min,$$

Основні позначення математичної моделі:

$s_i(x^{source}, y^{source}, t) =$	n	- загальна кількість сенсорів;
$= U(x_i^{sensor}, y_i^{sensor}, t);$	τ_i^{beg}	- час початку спостереження на i -му сенсорі;
$0 \leq \tau_i^{beg} < \tau_i^{end} \leq T, i = \overline{1, n};$	τ_i^{end}	- час закінчення спостереження на i -му сенсорі;
$\partial^2 U / \partial t^2 = \Delta U$ для $\Omega, t \in [0; T];$	$s_i^{experimental}(t)$	- зняті дані i -им сенсором протягом певного проміжку часу $[\tau_i^{beg}; \tau_i^{end}]$;
$\Omega = (x, y) \in [a; b] \times [c; d], a, b, c, d \in \mathbb{R};$	T	- загальний час проведення експерименту.
$U(x, y, 0) = U_t(x, y, 0) = 0.$	Ω	- розрахункова область задачі (досліджуваний об'єкт);
$\partial U / \partial \bar{n} \Big _{\Gamma} = 0, t \in [0; T];$	A	- амплітуда;
$U(x^{source}, y^{source}, t) = A \sin 2\pi f t.$	f	- частота;
	$(x_i^{sensor}, y_i^{sensor})$	- положення i -го сенсора;
	(x^{source}, y^{source})	- положення збудника коливань.

ДАНІ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ПРИ ЗНАХОДЖЕННІ РОЗВ'ЯЗКУ МОДЕЛІ

$$F(x^{source}, y^{source}) = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \int_0^{1,5} \left(s_i(x^{source}, y^{source}, t) - s_i^{experimental}(t) \right)^2 dt \rightarrow \min,$$

$$\begin{cases} s_i(x^{source}, y^{source}, t) = \\ = U(x_i^{sensor}, y_i^{sensor}, t); \end{cases}$$

$$\partial^2 U / \partial t^2 = \Delta U \text{ для } \Omega, t \in [0; 1,5];$$

$$\Omega = (x, y) \in [0; 1]^2, i = \overline{1,8};$$

$$U(x, y, 0) = U_t(x, y, 0) = 0.$$

$$\partial U / \partial \bar{n} \Big|_{\Gamma} = 0, t \in [0; 1,5];$$

$$U(x^{source}, y^{source}, t) = A \sin 2\pi f t.$$

Розрахункова сітка 60х60 (МКР).

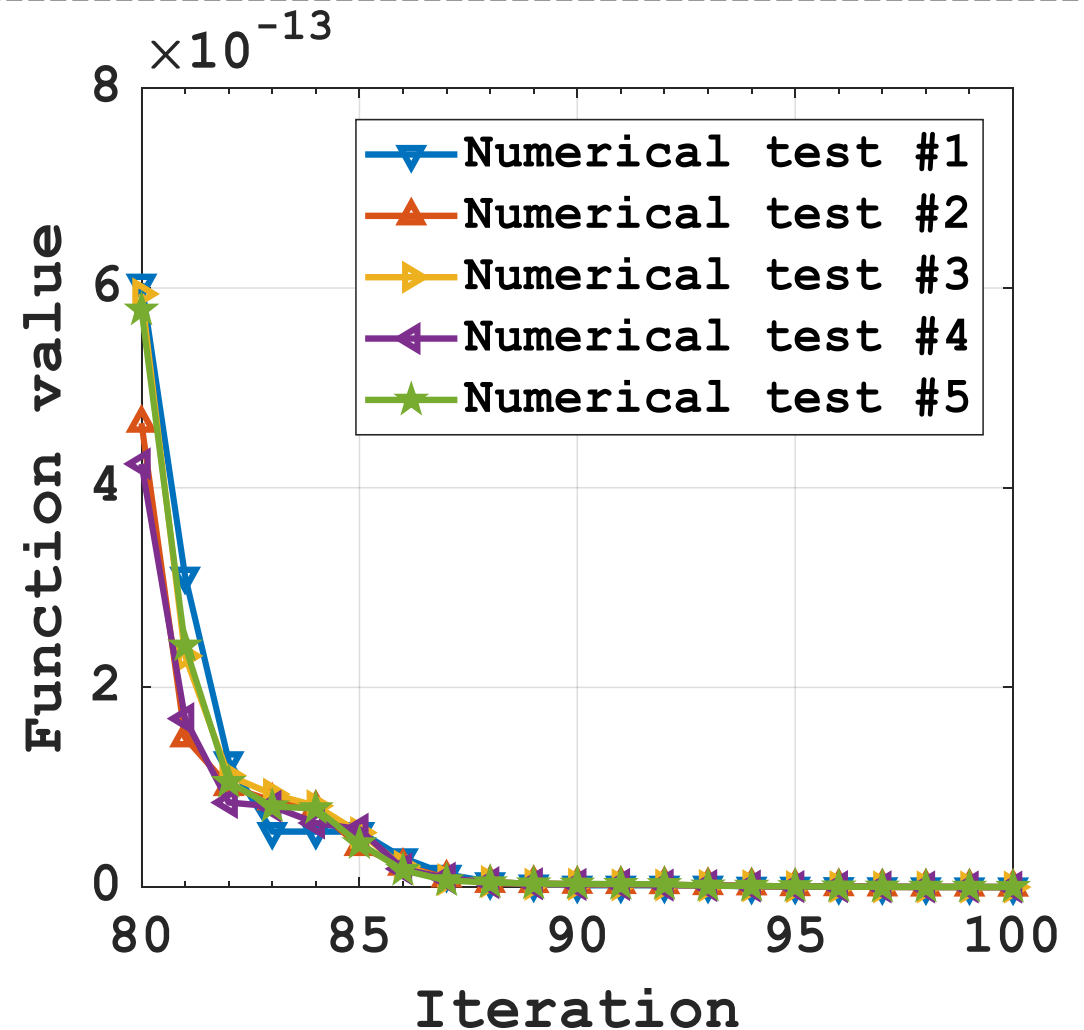
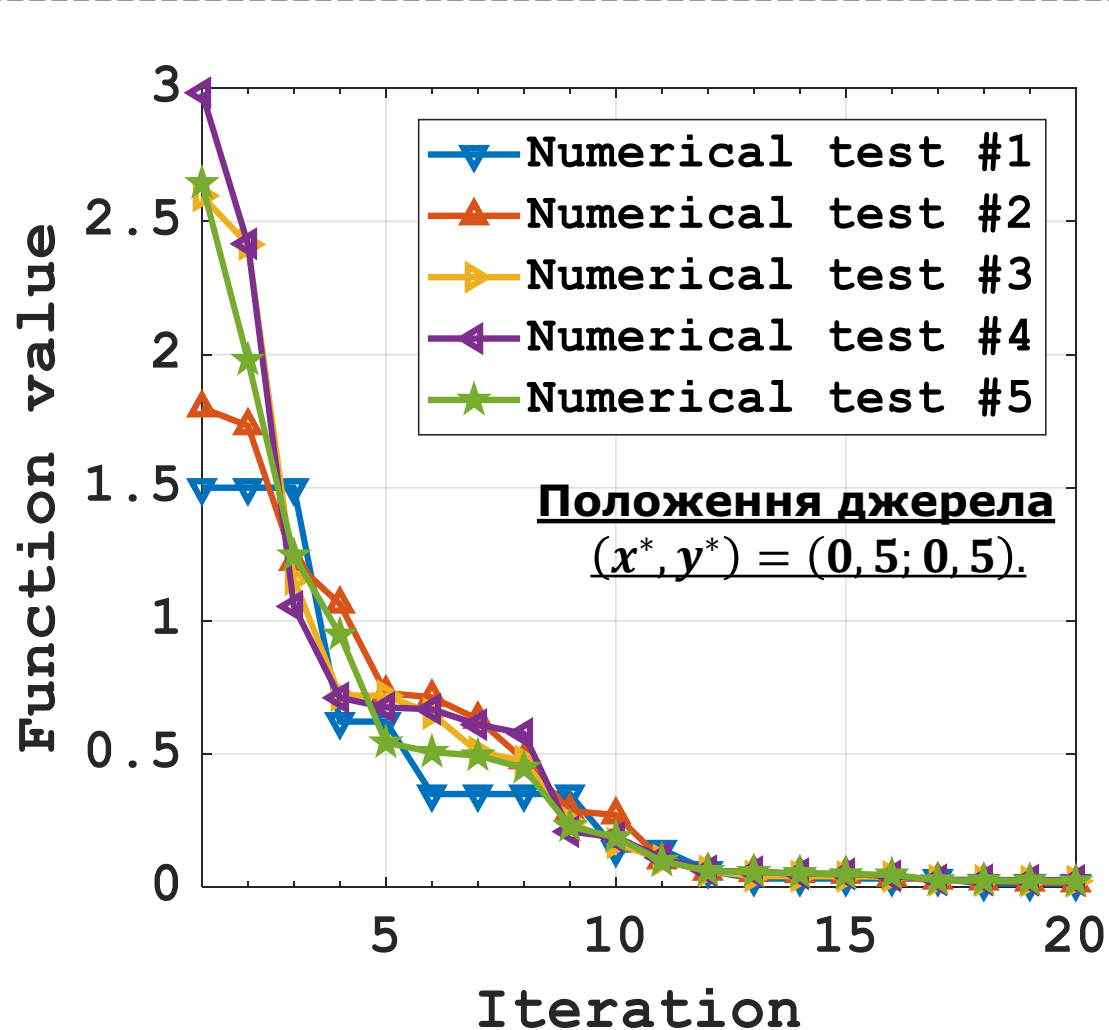
w = 32 - кількість біт для кодування.

Характеристики джерела: $A = 30^{-1}; f = 9$.

Положення сенсорів:

х	у
0.5333	0.0667
0.7167	0.9167
0.4500	0.1167
0.1500	0.3500
0.3167	0.8500
0.1000	0.2833
0.8667	0.5167
0.4167	0.9000

ЗБІЖНІСТЬ ОБРАНОГО МЕТОДУ ОПТИМІЗАЦІЇ ЗА ЗНАЧЕННЯМ ЦІЛЬОВОГО ФУНКЦІОНАЛА



МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ПОШИРЕННЯ СИГНАЛУ ДЖЕРЕЛА У ТВЕРДИХ ТІЛАХ

$$F(c) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \int_{\tau_i^{beg}}^{\tau_i^{end}} \left(s_i(c, t) - s_i^{experimental}(t) \right)^2 dt \rightarrow \min,$$

Основні позначення математичної моделі:

$s_i(c, t) = U(x_i^{sensor}, y_i^{sensor}, t);$	n	- загальна кількість сенсорів;
$0 \leq \tau_i^{beg} < \tau_i^{end} \leq T, i = \overline{1, n};$	τ_i^{beg}	- час початку спостереження на i -му сенсорі;
$\partial^2 U / \partial t^2 = c^2 \Delta U$ для $\Omega, t \in [0; T];$	τ_i^{end}	- час закінчення спостереження на i -му сенсорі;
$\Omega = (x, y) \in [a; b] \times [c; d], a, b, c, d \in \mathbb{R};$	$s_i^{experimental}(t)$	- зняті дані i -им сенсором протягом певного проміжку часу $[\tau_i^{beg}; \tau_i^{end}]$;
$U(x, y, 0) = U_t(x, y, 0) = 0.$	T	- загальний час проведення експерименту.
$\partial U / \partial \vec{n} \Big _{\Gamma} = 0, t \in [0; T];$	Ω	- розрахункова область задачі (досліджуваний об'єкт);
$U(x^{source}, y^{source}, t) = A \sin 2\pi f t.$	A, f	- амплітуда та частота;
	c	- швидкість поширення звукових хвиль
	$(x_i^{sensor}, y_i^{sensor})$	- положення i -го сенсора;
	(x^{source}, y^{source})	- положення збудника коливань.

ДАНІ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ПРИ ЗНАХОДЖЕННІ РОЗВ'ЯЗКУ МОДЕЛІ

$$F(x^{source}, y^{source}) = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \int_0^{1,5} \left(s_i(c, t) - s_i^{experimental}(t) \right)^2 dt \rightarrow \min,$$

$$\left\{ \begin{array}{l} s_i(c, t) = U(x_i^{sensor}, y_i^{sensor}, t); \\ \partial^2 U / \partial t^2 = c^2 \Delta U \text{ для } \Omega, t \in [0; 1,5]; \\ \Omega = (x, y) \in [0; 1]^2, i = \overline{1,8}; \\ U(x, y, 0) = U_t(x, y, 0) = 0. \\ \partial U / \partial \vec{n} \Big|_{\Gamma} = 0, t \in [0; 1,5]; \\ U(x^{source}, y^{source}, t) = A \sin 2\pi f t. \end{array} \right.$$

Розрахункова сітка 60х60 (МКР) .

w = 32 - кількість біт для кодування.

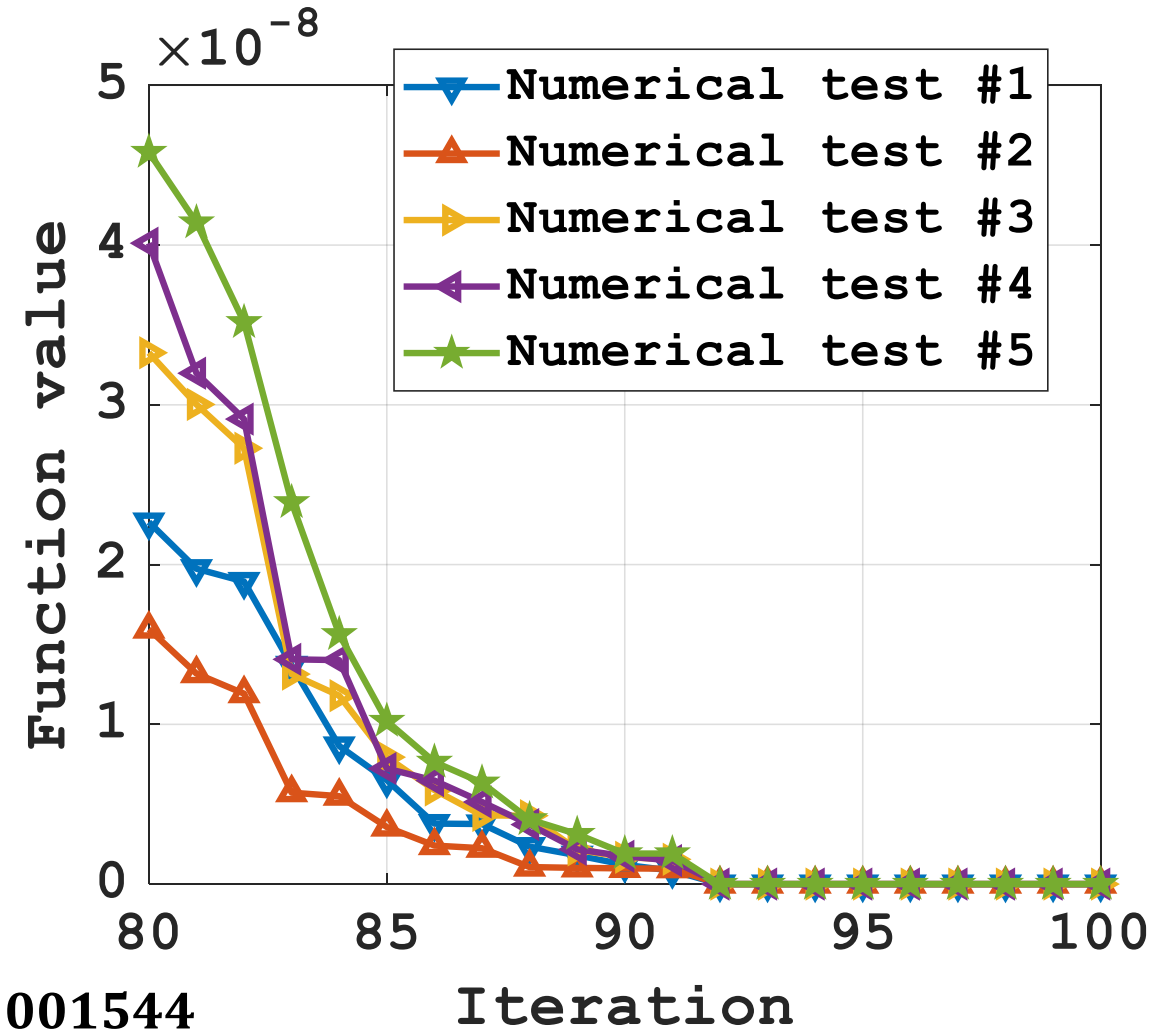
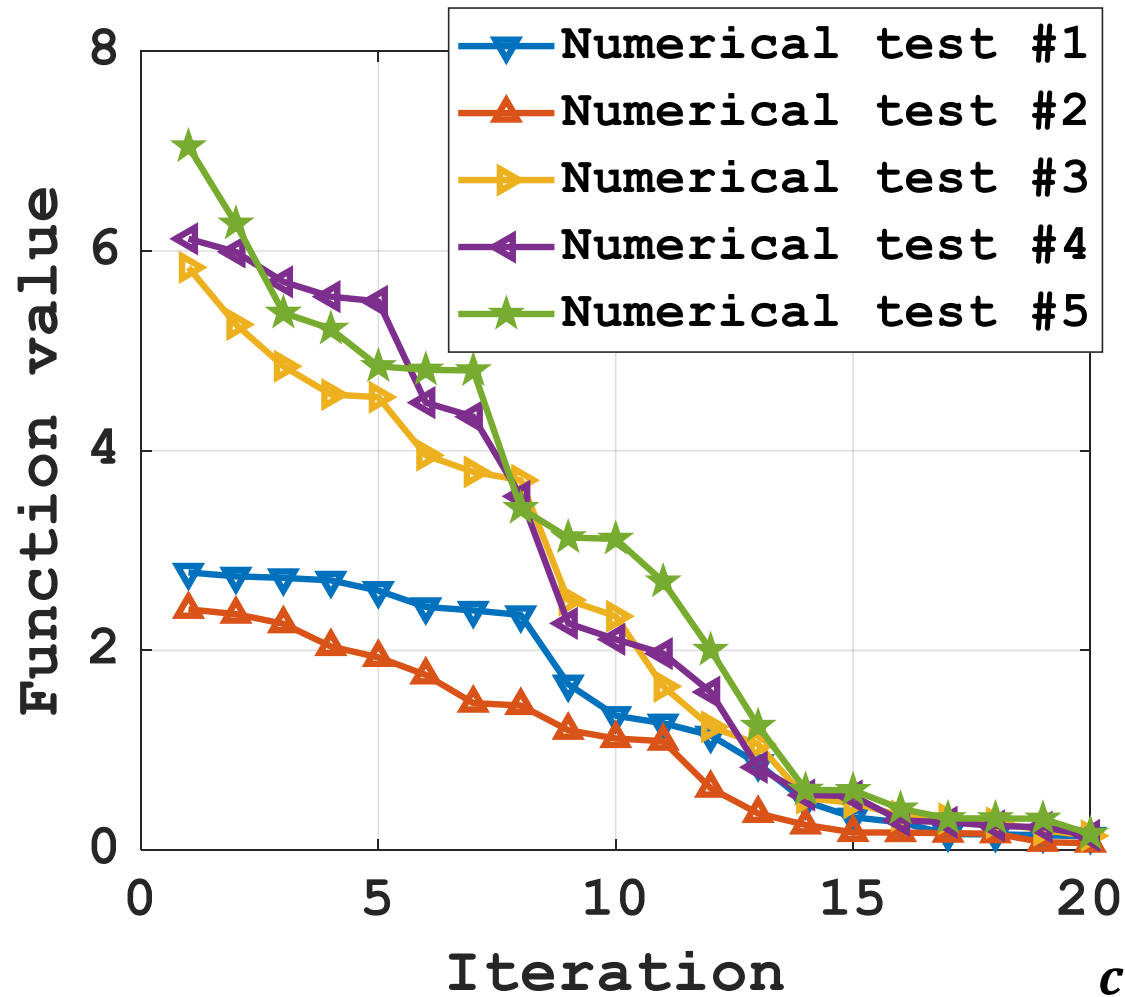
Положення джерела: $x = 0,5; y = 0,5$.

Характеристики джерела: $A = 30^{-1}; f = 9$.

Положення сенсорів:

x	y
0.5333	0.0667
0.7167	0.9167
0.4500	0.1167
0.1500	0.3500
0.3167	0.8500
0.1000	0.2833
0.8667	0.5167
0.4167	0.9000

ЗБІЖНІСТЬ ОБРАНОГО МЕТОДУ ОПТИМІЗАЦІЇ ЗА ЗНАЧЕННЯМ ЦІЛЬОВОГО ФУНКЦІОНАЛА



Дякую за увагу!

