

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ НАГРУЖЕННОГО
ДИФФУЗИОННО-ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ С
ДРОБНОЙ ПРОИЗВОДНОЙ КАПУТОО.Х. АБДУЛЛАЕВ *Представлено*

Abstract: In this work, we discuss an inverse problem with a nonlinear gluing condition for a loaded diffusion-wave equation with two lines of changing type, containing a nonlinear loaded term. Uniqueness and existence are proven using theories of integral equations and the methods of successive approximations and compressed mappings. The necessary classes and sufficient conditions for the given functions are determined to ensure the unique solvability of the problem under study.

Keywords: inverse problem, loaded diffusion-wave equation, nonlinear loaded, non linear gluing condition, uniqueness and existence.

1 Введение

Данная работа посвящена исследованию обратной задачи с нелинейными условиями склеивания для нагруженного парабола-гиперболического уравнения

$$f(x, y) = \begin{cases} u_{xx} - c D_{oy}^\alpha u + p_0(x, y; u(x; 0)); & \text{при } x > 0; y > 0, \\ u_{xx} - u_{yy} + p_1(x, y; u(x; 0)); & \text{при } x > 0; y < 0, \\ u_{xx} - u_{yy} + p_2(x, y; u(0; y)); & \text{при } x < 0; y > 0, \end{cases} \quad (1)$$

ABDULLAEV, O.KH., INVERSE PROBLEM FOR A LOADED DIFFUSION-WAVE EQUATION WITH THE CAPUTO FRACTIONAL DERIVATIVE.

© 2024 АБДУЛЛАЕВ О.Х..

Поступила 2024 г., опубликована ... декабря 2024 г.

с оператором Капуто [1]:

$${}_C D_{0y}^\alpha f(y) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^y (y-z)^{-\alpha} f'(z) dz,$$

дробного порядка $0 < \alpha < 1$, где $p_i(\cdot)$, $i = 0, 1, 2$ - заданные функционалы, действующие на следы решения уравнения (1).

Локальная задача с разрывными (линейными) условиями склеивания для уравнения

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1 - \text{sign}(xy)}{2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1 + \text{sign}(xy)}{2} \cdot {}_C D_{0t}^\alpha u = f(x, y), \quad (\alpha \in (0, 1))$$

была исследована Б.Кадыркуловым [2], где $f(x, y)$ -заданная функция. Единственность решения была доказана методом интегралов энергии, а существование доказано методом интегральных уравнений. Следует отметить, что в работе [3], доказано однозначная разрешимость прямой задачи с интегральными условиями склеивания для нагруженного диффузионно-волнового уравнения с двумя линиями изменения типа. При исследовании поставленной задачи были получены нелинейное интегро-дифференциальное уравнение (относительно $u(x, 0) = \tau_1(x)$) и линейное интегральное уравнение типа Вольтерра второго рода (относительно $u_y(0, y) = \tau_2'(y)$) со слабой особенностью. В этой работе, доказано однозначная разрешимость нелинейных интегральных уравнений при определенных условиях на заданные функции и при ограничениях на размерность рассматриваемой области.

Прямые и обратные задачи с непрерывными и разрывными условиями склеивания для парабола-гиперболических нагруженных уравнений с одной линией изменения типа, содержащие содержащие нелинейные нагрузки были исследованы в работах [4]-[7].

2 Постановка задачи и функциональные соотношения

Рассмотрим уравнение (1) в конечной области $\Omega \subset R^2$, ограниченной сегментами $A_1A_2; A_2B_2$ на прямых $x = 1; y = h$ при $x \geq 0; y \geq 0$, и $A_1C_1; C_1B_1$ на характеристиках $x - y = 1; x + y = 0$ уравнения (1) при $x > 0; y < 0$, а также сегментами $B_1C_2; C_2B_2$ на характеристиках $x + y = 0, y - x = h$ уравнения (1) при $x < 0; y > 0$, здесь $h = \text{const} > 0$. Прямоугольную часть смешанной области Ω обозначим через Ω_0 , а гиперболические части через Ω_1 при $x > 0$ и Ω_2 при $x < 0$, также введем обозначение $I = \{x : 0 < x < 1\}$.

Пусть,

$$f(x, y) = \begin{cases} f_1(x)g_1(y), & (x, y) \in \Omega_1; \\ f_2(y)g_2(x), & (x, y) \in \Omega_2; \\ f_1(x)g_0(y), & (x, y) \in \Omega_0. \end{cases} \quad (2)$$

где $g_0(y), g_1(y), g_2(x)$ - заданные функции, $f_1(x), f_2(y)$ - неизвестные функции, которых требуется определить.

Задача IP. Требуется найти тройку функций $\{f_1(x), f_2(y), u(x; y)\}$ для уравнения (1) в области Ω со следующими свойствами:

1. $f_1(x) \in C(0, 1) \cap l_1(0, 1)$, $f_2(y) \in C(0, h) \cap l_1(0, h)$;
2. $u \in C(\bar{\Omega}) \cap C^1(\bar{\Omega}_1 \cup \bar{\Omega}_2) \cap C^2(\Omega_1 \cup \Omega_2)$; $u_{xx} \in C(\Omega_0)$, ${}_C D_{0y}^\alpha u \in C(\Omega_0 \cup I)$,
3. $u(x, y)$ удовлетворяет краевым условиям:

$$u(1; y) = \varphi(y), \quad 0 \leq y \leq h; \quad (3)$$

$$u(x; -x) = \psi_1(x), \quad 0 \leq x \leq \frac{1}{2}; \quad (4)$$

$$u(-y; y) = \psi_2(y), \quad 0 \leq y \leq \frac{h}{2}; \quad (5)$$

дополнительным условиям:

$$\frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{y=-x} = \varphi_1(x), \quad 0 \leq x \leq \frac{1}{2}; \quad \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{y=x-1} = \varphi_2(x), \quad \frac{1}{2} \leq x \leq 1; \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{x=-y} = \varphi_3(y), \quad 0 \leq y \leq \frac{h}{2}; \quad \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{x=y-1} = \varphi_4(y), \quad \frac{h}{2} \leq y \leq h; \quad (7)$$

и нелинейным условиям склеивания:

$$\begin{aligned} \lim_{y \rightarrow +0} y^{1-\alpha} u_y(x; y) &= \lambda_1(x) u_y(x; -0) + \lambda_2(x) u_x(x; -0) + \\ &+ \lambda_3(x) r_1(x, u(x, 0)) + \lambda_4(x), \quad 0 < x < 1; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} u_x(+0; y) &= \mu_1(y) u_x(-0; y) + \mu_2(y) u_y(-0; y) + \\ &+ \mu_3(y) r_2(y, u(0; y)) + \mu_4(y); \quad 0 < y < h, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\lambda_k(x), \mu_k(y)$, ($k = 1, 2, 3, 4$), $\varphi_i(x), \varphi_{i+2}(y)$, ($i = 1, 2$), $\psi_1(x), \psi_2(y)$, $\varphi(y)$, $r_1(x, z)$, $r_2(y, z)$ – заданные достаточно гладкие функции, причем,

$$\varphi'_1\left(\frac{1}{2}\right) = -\varphi'_2\left(\frac{1}{2}\right), \quad \varphi'_3\left(\frac{h}{2}\right) = -\varphi'_4\left(\frac{h}{2}\right), \quad \sum_{k=1}^3 \lambda_k^2(x) \neq 0 \quad \text{и} \quad \sum_{k=1}^3 \mu_k^2(x) \neq 0.$$

2.1. Нахождение функций $f_1(x)$ и $f_2(y)$. Введем обозначения $u(x, 0) = \tau_1(x)$, $0 \leq x \leq 1$, $u(0, y) = \tau_2(y)$, $0 \leq y \leq h$. Учитывая (2), общее решение уравнения (1) в областях Ω_1 и Ω_2 , соответственно, ищем в виде

$$\begin{aligned} u(x, y) &= F_1(x + y) + F_2(x - y) + \omega(x) g_1(y) + \\ &+ \frac{1}{4} \int_{x+y}^{x-y} d\eta \int_{x+y}^{\eta} p_1 \left(\frac{\xi + \eta}{2}, \frac{\xi - \eta}{2}; \tau_1 \left(\frac{\xi + \eta}{2} \right) \right) d\xi \end{aligned} \quad (10)$$

и

$$\begin{aligned} u(x, y) &= F_1(x + y) + F_2(x - y) + w(y) g_2(x) + \\ &+ \frac{1}{4} \int_{x+y}^{y-x} d\eta \int_{x+y}^{\eta} p_2 \left(\frac{\xi - \eta}{2}, \frac{\xi + \eta}{2}; \tau_2 \left(\frac{\xi + \eta}{2} \right) \right) d\xi, \end{aligned} \quad (11)$$

где $F_1(\cdot)$ и $F_2(\cdot)$ – произвольные дважды непрерывно-дифференцируемые функции, а функции $\omega(x)$ и $w(y)$ любые регулярные решения, соответственно, уравнений $\omega''(x) - k\omega(x) = f_1(x)$ и $w''(y) - kw(y) = f_2(y)$,

здесь ($k = const$).

Далее, в силу дополнительных условий (6) и (7) из (10) и (11), соответственно находим

$$f_1(x) = \begin{cases} \frac{1}{g_1(-x)} (\sqrt{2}\varphi'_1(x) + p_1(x, x, \tau_1(x))), & 0 \leq x \leq \frac{1}{2}; \\ -\frac{1}{g_1(x-1)} (\sqrt{2}\varphi'_2(x) + p_1(x, x-1, \tau_1(x))), & \frac{1}{2} \leq x \leq 1, \end{cases} \quad (12)$$

и

$$f_2(y) = \begin{cases} -\frac{1}{g_2(-y)} (\sqrt{2}\varphi'_3(y) + p_2(-y, y, \tau_2(y))), & 0 \leq y \leq \frac{h}{2}; \\ \frac{1}{g_2(y-h)} (\sqrt{2}\varphi'_4(y) - p_2(y-h, y, \tau_2(y))), & \frac{h}{2} \leq y \leq h. \end{cases} \quad (13)$$

Следовательно, заключаем что, если функции $\tau_1(x)$ и $\tau_2(y)$ будут найдены однозначно, то неизвестные функции $f_1(x)$ и $f_2(y)$ единственным образом определяются из (12) и (13), соответственно. С этой целью, однозначную разрешимость поставленную задачу сведем к задаче однозначного нахождения функций $\tau_1(x)$ и $\tau_2(y)$.

2.2. Основные функциональные соотношения. В силу решение задачи Коши для уравнения (1) с начальными данными

$$u(x, 0) = \tau_1(x), \quad 0 \leq x \leq 1; \quad u_y(x, -0) = \nu_1^-(x), \quad 0 < x < 1$$

и

$$u(0, y) = \tau_2(y), \quad 0 \leq y \leq h; \quad u_x(-0, y) = \nu_2^-(y), \quad 0 < y < h,$$

а также, воспользовавшись краевыми условиями (4) и (5), находим основные функциональные соотношения

$$\begin{aligned} \nu_1^-(x) = & \tau'_1(x) - \psi'_1\left(\frac{x}{2}\right) - \frac{1}{2} \int_0^x p_1\left(\frac{\xi+x}{2}, \frac{\xi-x}{2}; \tau_1\left(\frac{\xi+x}{2}\right)\right) d\xi + \\ & + \frac{1}{2} \int_0^x f_1\left(\frac{\xi+x}{2}\right) g_1\left(\frac{\xi-x}{2}\right) d\xi, \quad 0 < x < 1; \end{aligned} \quad (14)$$

и

$$\begin{aligned} \nu_2^-(y) = & \tau'_2(y) - \psi'_2\left(\frac{y}{2}\right) - \frac{1}{2} \int_0^y p_2\left(\frac{\xi-y}{2}, \frac{\xi+y}{2}; \tau_2\left(\frac{\xi+y}{2}\right)\right) d\xi + \\ & + \frac{1}{2} \int_0^y f_2\left(\frac{\xi+y}{2}\right) g_2\left(\frac{\xi-y}{2}\right) d\xi, \quad 0 < y < h, \end{aligned} \quad (15)$$

соответственно из гиперболических областей Ω_1 и Ω_2 .

Вводя обозначения $\lim_{y \rightarrow +0} y^{1-\alpha} u_y(x, y) = \nu_1^+(x)$ и $u_x(+0, y) = \nu_2^+(y)$, из нелинейных условий склеивания (8) и (9), имеем

$$\begin{aligned} \nu_1^+(x) = & \lambda_1(x)\nu_1^-(x) + \lambda_2(x)\tau'_1(x) + \lambda_3(x)r_1(x, \tau_1(x)) + \\ & + \lambda_4(x), \quad x \in [0, 1], \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \nu_2^+(y) = & \mu_1(y)\nu_2^-(y) + \mu_2(y)\tau'_2(y) + \mu_3(y)r_2(y, \tau_2(y)) + \\ & + \mu_4(y), \quad y \in [0, h]. \end{aligned} \quad (17)$$

Далее, из диффузионного уравнения (1) при $y \rightarrow +0$, с учетом равенства $\lim_{y \rightarrow 0} D_{0y}^{\alpha-1} f(y) = \Gamma(\alpha) \lim_{y \rightarrow 0} y^{1-\alpha} f(y)$ (см [8]) и условия склеивания (16), имеем

$$\begin{aligned} & \tau_1''(x) - \Gamma(\alpha)\lambda_1(x)\nu_1^-(x) - \Gamma(\alpha)\lambda_2(x)\tau_1'(x) - \\ & - \Gamma(\alpha)\lambda_3(x)r_1(x, \tau_1(x)) - f_1(x)g_1(0) - \\ & - \Gamma(\alpha)\lambda_4(x) + p_0(x, 0; \tau_1(x)) = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

Учитывая (12), подставляем (14) в уравнение (18), и получим интегродифференциальное уравнение относительно $\tau_1(x)$:

$$\begin{aligned} & \tau_1''(x) - \Gamma(\alpha)(\lambda_1(x) + \lambda_2(x))\tau_1'(x) - \\ & - \Gamma(\alpha)\lambda_3(x)r_1(x, \tau_1(x)) + p_0(x, 0; \tau_1(x)) - g_1(0)A_1(x, \tau_1(x)) + \\ & + \frac{\Gamma(\alpha)}{2}\lambda_1(x) \int_0^x p_1\left(\frac{\xi+x}{2}, \frac{\xi-x}{2}; \tau_1\left(\frac{\xi+x}{2}\right)\right) d\xi - \\ & - \frac{\Gamma(\alpha)}{2}\lambda_1(x) \int_0^x A_1\left(\frac{\xi+x}{2}, \tau_1\left(\frac{\xi+x}{2}\right)\right) g_1\left(\frac{\xi-x}{2}\right) d\xi - \\ & - \frac{\Gamma(\alpha)}{2}\lambda_1(x) \int_0^x B_1\left(\frac{\xi+x}{2}\right) g_1\left(\frac{\xi-x}{2}\right) d\xi - \Gamma(\alpha)\left(\lambda_4(x) - \lambda_1(x)\psi_1'\left(\frac{x}{2}\right)\right) + \\ & + g_1(0)B_1(x) = 0, \end{aligned} \quad (19)$$

где

$$\begin{aligned} A_1(x, \tau_1(x)) &= \begin{cases} \frac{1}{g_1(-x)}p_1(x, -x, \tau_1(x)), & 0 \leq x \leq \frac{1}{2}; \\ -\frac{1}{g_1(x-1)}p_1(x, x-1, \tau_1(x)), & \frac{1}{2} \leq x \leq 1, \end{cases} \\ B_1(x) &= \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{g_1(-x)}\varphi_1'(x), & 0 \leq x \leq \frac{1}{2}; \\ -\frac{\sqrt{2}}{g_1(x-1)}\varphi_2'(x), & \frac{1}{2} \leq x \leq 1. \end{cases} \end{aligned}$$

3 Нелинейные интегральные уравнения

В силу класс искомой функции, учитывая (14), имеем

$$\tau_1(0) = \psi_1(0), \quad \tau_1'(0) = \frac{1}{2}(\sqrt{2}\varphi_1'(0) - \psi_1'(0)). \quad (20)$$

Далее, интегрируя уравнение (19) от 0 до x дважды, с учетом условий (20), получим нелинейное интегральное уравнение типа Вольтерра второго рода:

$$\tau_1(x) + \int_0^x K(x, z)\tau_1(z)dz + \int_0^x (x-z)\Phi_1(z; \tau_1(z))dz = G(x), \quad (21)$$

где

$$\begin{aligned} K(x, z) &= \Gamma(\alpha)(x-z)(\lambda_1'(z) + \lambda_2'(z)) - \Gamma(\alpha)(\lambda_1(z) + \lambda_2(z)), \quad (22) \\ \Phi_1(x; \tau_1(x)) &= p_0(x, \tau_1(x)) - \Gamma(\alpha)\lambda_3(x)r_1(x, \tau_1(x)) - g_1(0)A_1(x, \tau_1(x)) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\Gamma(\alpha)}{2} \lambda_1(x) \int_0^x p_1 \left(\frac{\xi+x}{2}, \frac{\xi-x}{2}; \tau_1 \left(\frac{\xi+x}{2} \right) \right) d\xi - \\
 & - \frac{\Gamma(\alpha)}{2} \lambda_1(x) \int_0^x A_1 \left(\frac{\xi+x}{2}, \tau_1 \left(\frac{\xi+x}{2} \right) \right) g_1 \left(\frac{\xi-x}{2} \right) d\xi, \quad (23)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 G(x) &= \frac{\Gamma(\alpha)}{2} \int_0^x \lambda_1(t)(x-t) dt \int_0^t B_1 \left(\frac{\xi+t}{2} \right) g_1 \left(\frac{\xi-t}{2} \right) d\xi + \\
 & + \Gamma(\alpha) \int_0^x (x-t) \left(\lambda_4(t) - \lambda_1(t) \psi_1' \left(\frac{t}{2} \right) \right) dt - g_1(0) \int_0^x (x-t) B_1(t) dt + \\
 & + \psi_1(0) + \frac{x}{2} (\sqrt{2} \varphi_1'(0) - \psi_1'(0)). \quad (24)
 \end{aligned}$$

С другой стороны, воспользовавшись решением первой краевой задачи для параболического уравнения в области Ω_0 , находим второе функциональное соотношение между $\tau_2(y)$ и $\nu_2^+(y)$ на отрезке $B_1 B_2$, которое имеет вид [2, 9]:

$$\nu_2^+(y) = - \int_0^y K_1(y-t) \tau_2'(t) dt + F(y), \quad (25)$$

где

$$\begin{aligned}
 K_1(y-t) &= \frac{1}{(y-t)^\beta} \left[\frac{1}{\Gamma(1-\beta)} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e_{1,\beta}^{1,1-\beta} \left(-\frac{2n}{(y-t)^\beta} \right) \right], \quad \beta = \frac{\alpha}{2}, \\
 F(y) &= 2 \int_0^y \sum_{m=0}^{\infty} (y-\eta)^{-\beta-1} e_{1,\beta}^{1,-\beta} \left(-\frac{2m+1}{(y-\eta)^\beta} \right) \varphi(\eta) d\eta - \\
 & - \int_0^1 \sum_{m=0}^{\infty} y^{-\alpha} e_{1,\beta}^{1,1-\alpha} \left(-\frac{2m-\xi}{y^\beta} \right) \tau_1(\xi) d\xi - \\
 & - \lim_{x \rightarrow +0} \int_0^y \int_0^l G_x(x, y, \xi, \eta) p_0(\xi, \eta, \tau_1(\xi)) d\xi d\eta + \\
 & + \lim_{x \rightarrow +0} \int_0^y d\eta \int_0^1 G_x(x, y, \xi, \eta) f_1(\xi) g_0(\eta) d\xi.
 \end{aligned}$$

$e_{1,\beta}^{1,\gamma}(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n! \Gamma(\gamma - \beta n)}$ – функция типа Райта [8], а

$$G(x, y, \xi, \eta) = \frac{(y-\eta)^{\alpha/2-1}}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[e_{1,\alpha/2}^{1,\alpha/2} \left(-\frac{|x-\xi+2nl|}{(y-\eta)^{\alpha/2}} \right) - \right.$$

$$\left. -e_{1,\alpha/2}^{1,\alpha/2} \left(-\frac{|x + \xi + 2nl|}{(y - \eta)^{\alpha/2}} \right) \right],$$

функции Грина первой краевой задачи [8, 10].

Заметим, что ядро $K(y-t)$ представленное в виде ряда функций типа Райта, имеет слабую особенность (см [8], (2.2.5), (2.2.24)), т.е. $|K(y-t)| \leq \text{const} \cdot (y-t)^{-\beta}$. Также, можно убедиться что $|F_1(y)| \leq \text{const}$ (см. [8])

Учитывая (15), (17) и (25), получим:

$$\begin{aligned} & \mu_0(y)\tau_2'(y) + \int_0^y K_1(y-t)\tau_2'(t)dt + \mu_3(y)r_2(y, \tau_2(y)) - \\ & - \frac{\mu_1(y)}{2} \int_0^y p_2 \left(\frac{\xi+y}{2}, \frac{\xi-y}{2}, \tau_2 \left(\frac{\xi+y}{2} \right) \right) dz + \\ & + \frac{\mu_1(y)}{2} \int_0^y A_2 \left(\frac{\xi+y}{2}, \tau_2 \left(\frac{\xi+y}{2} \right) \right) g_2 \left(\frac{\xi-y}{2} \right) d\xi = F_1(y), \end{aligned} \quad (26)$$

где $\mu_0(y) = \mu_1(y) + \mu_2(y)$,

$$F_1(y) = F(y) + \mu_1(y)\psi_2' \left(\frac{y}{2} \right) - \frac{\mu_1(y)}{2} \int_0^y B_2 \left(\frac{\xi+y}{2} \right) g_2 \left(\frac{\xi-y}{2} \right) d\xi - \mu_4(y),$$

$$A_2(y, \tau_2(y)) = \begin{cases} -\frac{1}{g_2(-y)} p_2(-y, y, \tau_2(y)), & 0 \leq y \leq \frac{h}{2}; \\ -\frac{1}{g_2(y-h)} p_2(y-h, y, \tau_2(y)), & \frac{h}{2} \leq h \leq 1, \end{cases} \quad (27)$$

$$B_2(y) = \begin{cases} -\frac{\sqrt{2}}{g_2(-y)} \varphi_2'(y), & 0 \leq y \leq \frac{h}{2}; \\ \frac{\sqrt{2}}{g_2(y-h)} \varphi_3'(y), & \frac{h}{2} \leq h \leq 1. \end{cases}$$

Учитывая $\int_z^y K_1(t-z)dt = (y-z)^{1-\beta} K_2(y-z)$, причем $|K_2(y-z)| \leq \text{const}$, интегрируем уравнение (26) от 0 до y , и имеем

$$\begin{aligned} & \mu_0(y)\tau_2(y) - \mu_0(0)\tau_2(0) - \int_0^y \mu_0'(t)\tau_2(t)dt + \int_0^y K_0(y,t)\tau_2(t)dt - \tau_2(0)y^{1-\beta}K_2(y) + \\ & + \int_0^y \mu_3(t)r_2(t, \tau_2(t))dt - \int_0^y \frac{\mu_1(t)}{2} dt \int_0^t p_2 \left(\frac{\xi+t}{2}, \frac{\xi-t}{2}, \tau_2 \left(\frac{\xi+t}{2} \right) \right) dz + \\ & + \int_0^y \frac{\mu_1(t)}{2} dt \int_0^t A_2 \left(\frac{\xi+t}{2}, \tau_2 \left(\frac{\xi+t}{2} \right) \right) g_2 \left(\frac{\xi-t}{2} \right) d\xi = \int_0^y F_1(t)dt \end{aligned} \quad (28)$$

где $K_0(y,t) = [(y-t)^{1-\beta} K_2(y-t)]'_t$.

Пусть $\mu_0(y) \neq 0$, тогда интегральное уравнение (28) перепишем в виде:

$$\begin{aligned} & \tau_2(y) + \int_0^y K_3(y, t) \tau_2(t) dt + \int_0^y \frac{\mu_3(t)}{\mu_0(y)} r_2(t, \tau_2(t)) dt - \\ & - \int_0^y \frac{\mu_1(t)}{2\mu_0(y)} dt \int_0^t \Phi_2 \left(\frac{\xi+t}{2}, \frac{\xi-t}{2}, \tau_2 \left(\frac{\xi+t}{2} \right) \right) d\xi = F_2(y), \end{aligned} \quad (29)$$

где $K_3(y, t) = \frac{K_0(y, t) - \mu'_2(t)}{\mu_0(y)}$,

$$\Phi_2(\xi, \eta, \tau_2(\xi)) = p_2(\xi, \eta, \tau_2(\xi)) - A_2(\xi, \tau_2(\xi)) g_2(\eta), \quad (30)$$

$$F_2(y) = \frac{\psi_1(0)(\mu_0(0) + y^{1-\beta} K_2(y))}{\mu_0(y)} + \frac{1}{\mu_0(y)} \int_0^y F_1(t) dt. \quad (31)$$

4 Основной результат. Исследования нелинейных интегральных уравнений

Пусть,

$$r_1(x, z) \in C([0, 1] \times R), r_2(y, z) \in C([0, h] \times R), |r_i(\cdot, z)| \leq \text{const}|z|, \quad (32)$$

$$p_0(x, y, z) \in C(\overline{\Omega_0} \times R) \cap C_{x,y,z}^{0,1,0}(\Omega_0 \times R), |p_0(x, y, z)| \leq \text{const}|z|, \quad (33)$$

$$p_i(x, y, z) \in C(\overline{\Omega_i} \times R) \cap C_{x,y,z}^{0,1,0}(\Omega_i \times R), |p_i(x, y, z)| \leq \text{const}|z|, \quad (34)$$

$$|p_0(x, y; z_1) - p_0(x, y; z_2)| \leq L_0|z_1 - z_2|, \forall (x, y) \in \Omega_0, \forall z_1, z_2 \in R, \quad (35)$$

$$|p_i(x, y; z_1) - p_i(x, y; z_2)| \leq L_i|z_1 - z_2|, \forall (x, y) \in \Omega_i, \forall z_1, z_2 \in R, \quad (36)$$

$$|r_1(x, z_1) - r_1(x, z_2)| \leq L_3|z_1 - z_2|, \forall x \in (0, 1), \forall z_1, z_2 \in R, \quad (37)$$

$$|r_2(y, z_1) - r_2(y, z_2)| \leq L_4|z_1 - z_2|, \forall y \in (0, h), \forall z_1, z_2 \in R, \quad (38)$$

где $L_0, L_i = \text{const} > 0$, ($i = 1, 4$). Тогда, имеет место,

Теорема 1. Пусть имеют место условия (32)-(38) и

$$\lambda_i(x) \in C[0, 1] \cap C^1(0, 1), \mu_i(y), \varphi(y) \in C[0, h] \cap C^1(0, h) \quad (i = \overline{3, 4}); \quad (39)$$

$$\lambda_j(x) \in C^1[0, 1], \quad (j = 1, 2), \psi_1(x), \varphi_1(x) \in C^1 \left[0, \frac{1}{2} \right] \cap C^2 \left(0, \frac{1}{2} \right); \quad (40)$$

$$\mu_j(y) \in C^1[0, h], \quad (j = 1, 2), \varphi_3(y), \psi_2(y) \in C^1 \left[0, \frac{h}{2} \right] \cap C^2 \left(0, \frac{h}{2} \right); \quad (41)$$

$$\varphi_4(y) \in C^1 \left[\frac{h}{2}, h \right] \cap C^2 \left(\frac{h}{2}, h \right), \varphi_2(x) \in C^1 \left[\frac{1}{2}, 1 \right] \cap C^2 \left(\frac{1}{2}, 1 \right), \quad (42)$$

$$g_0(y), g_1(y) \in C^1[0, h], g_2(x) \in C^1[0, 1] \cap C^2(0, 1); \quad (43)$$

тогда решение задачи IP существует и единственно.

Доказательство. Сперва доказываем однозначную разрешимость нелинейных интегральных уравнений (21) и (29). В силу класс заданных функций из (22) и (24) имеем

$$|K(x, z)| \leq k_0 = \text{const} > 0, \forall (x, z) \in [0, 1] \times [0, x], \quad (44)$$

$$|G(x)| \leq G_0 = \text{const} > 0, \forall x \in [0, 1]. \quad (45)$$

С другой стороны, воспользовавшись неравенствами (35)-(37) из (23), получим

$$\begin{aligned} |\Phi_1(x; z_1) - \Phi_1(x; z_2)| &\leq L_0|z_1 - z_2| + c_1L_3|z_1 - z_2| + c_2L_1|z_1 - z_2| + \\ &+ c_3L_1 \left| \int_0^x \left| z_1 \left(\frac{\xi + x}{2} \right) - z_2 \left(\frac{\xi + x}{2} \right) \right| d\xi \right| = \\ &= c_0|z_1 - z_2| + c_3L_1 \left| \int_0^x \left| z_1 \left(\frac{\xi + x}{2} \right) - z_2 \left(\frac{\xi + x}{2} \right) \right| d\xi \right|, \end{aligned} \quad (46)$$

где $c_0 = L_0 + c_1L_3 + c_2L_1$, $c_1, c_2, c_3 = \text{const} > 0$.

Разрешимость интегрального уравнения (21) доказываем методом последовательных приближений, при этом, функциональную последовательность относительно $\{\tilde{\tau}_n(x)\}$ ($\tilde{\tau}(x) = \tau_1(x)$) построим основываясь на рекуррентное уравнение

$$\tilde{\tau}_n(x) = G(x) - \int_0^x K(x, z)\tilde{\tau}_{n-1}(z)dz - \int_0^x (x-z)\Phi_1(z; \tilde{\tau}_{n-1}(z))dz \quad (47)$$

где $\tilde{\tau}_0(x) = G(x)$.

Учитывая $|\Phi_1(z; \tilde{\tau}(z))| \leq \Phi_{01}$, $\Phi_{01} = \text{const} > 0$ с учетом неравенств (44), (45) и (46), можно убедиться, что

$$\begin{aligned} |\tilde{\tau}_1(x) - \tilde{\tau}_0(x)| &\leq k_0\Phi_{01}x + \Phi_{01}\frac{x^2}{2} \leq \Phi_{01}(k_0 + 1)x, \\ |\tilde{\tau}_2(x) - \tilde{\tau}_1(x)| &\leq \Phi_{01}(k_0 + 1)(k_0 + c_0 + c_3L_1)\frac{x^2}{2!}, \\ &\dots \\ |\tilde{\tau}_n(x) - \tilde{\tau}_{n-1}(x)| &\leq (k_0 + c_0 + c_3L_1)^{n-1}\frac{x^n}{n!}\Phi_{01}(k_0 + 1). \end{aligned} \quad (48)$$

Из оценки (48) следует, что оператор в правой части интегрального уравнения (47) является сжимающим. Следовательно, для этого оператора существует единственная неподвижная точка, т.е. интегральное уравнение (21) имеет единственное решение в классе $C^1[0, 1] \cap C^2(0, 1)$. После определения функции $\tau_1(x)$, из функционального соотношения (14) находим $\nu_1^-(x)$, а также из (12) однозначно определяется функция $f_1(x)$. Следовательно, решение исследуемой задачи в области Ω_1 можно восстановить как решение задачи Коши.

Теперь исследуем однозначную разрешимость интегрального уравнения (29). В силу класс заданных функций, (34) и (41) - (43), находим

$$|K_3(y, t)| \leq K_{03} = \text{const} > 0, \quad 0 \leq t \leq y \leq h;$$

$$|\Phi_2(x, y, z)| \leq \Phi_{02} = \text{const} > 0, \quad \forall(x, y) \in \Omega_2, \quad \forall z \in (-\infty, +\infty);$$

$$\left| \frac{\mu_3(t)}{\mu_0(y)} \right| \leq \mu_{03} = \text{const} > 0, \quad \left| \frac{\mu_1(t)}{2\mu_0(y)} \right| \leq \mu_{02} = \text{const} > 0, \quad 0 \leq t \leq y \leq h.$$

Учитывая (36), (27), из (30) нетрудно убедиться, что

$$|\Phi_2(\xi, \eta, z_1) - \Phi_2(\xi, \eta, z_2)| \leq L_2|z_1 - z_2| + g_{02}L_2|z_1 - z_2| = c_4L_2|z_1 - z_2|,$$

где $c_4 = L_2(1 + g_{02})$, $\left| \frac{g_2(\eta)}{g_2(\xi)} \right| \leq g_{02}$, $g_{02} = \text{const} > 0$.

Рассмотрим рекуррентное уравнение

$$\begin{aligned} \tau_n^*(y) + \int_0^y K_3(y, t)\tau_{n-1}^*(t)dt + \int_0^y \frac{\mu_3(t)}{\mu_0(y)}r_2(t, \tau_{n-1}^*(t))dt - \\ - \int_0^y \frac{\mu_1(t)}{2\mu_0(y)}dt \int_0^t \Phi_2\left(\frac{\xi+t}{2}, \frac{\xi-t}{2}, \tau_{n-1}^*\left(\frac{\xi+t}{2}\right)\right) d\xi = F_2(y), \end{aligned} \quad (49)$$

где $\tau^*(y) = \tau_2(y)$.

Предполагая $\tau_0^*(y) = F_2(y)$, из рекуррентного уравнения (49), составим функциональную последовательность $\{\tau_n^*(y)\}$ сходимость которая следует из неравенств:

$$|\tau_1^*(y) - \tau_0^*(y)| \leq K_{03}f_{02} \cdot y + \mu_{03}r_0y + \mu_{01}\Phi_{02} \cdot \frac{y^2}{2} \leq \tilde{c} \cdot y,$$

$$|\tau_2^*(y) - \tau_1^*(y)| \leq K_{03}\tilde{c}\frac{y^2}{2!} + \mu_{03}\tilde{c}L_4\frac{y^2}{2!} + \mu_{01}\tilde{c}L_2\frac{y^3}{3!} \leq \tilde{c}\frac{y^2}{2!}\tilde{c}_0;$$

$$|\tau_3^*(y) - \tau_2^*(y)| \leq \tilde{c}\tilde{c}_0(K_{03} + \mu_{03}L_4 + \mu_{01}L_2)\frac{y^3}{3!} \leq \tilde{c}\tilde{c}_0^2\frac{y^3}{3!};$$

...

$$|\tau_n^*(y) - \tau_{n-1}^*(y)| \leq \tilde{c}\tilde{c}_0^{n-1}\frac{y^n}{n!},$$

при $0 < y < h \leq 1$, где $\tilde{c} = K_{03}f_{02} + \mu_{03}r_0 + \mu_{01}\Phi_{02}$, $\tilde{c}_0 = K_{03} + \mu_{03}L_4 + \mu_{01}L_2$. Отметим также, что если $1 < y < h < \infty$, то можно получить аналогичные неравенства, с помощью которых следует абсолютно и равномерная сходимость функциональной последовательности $\{\tau_n^*(y)\}$. Таким образом, доказано что интегральное уравнение (29) однозначно разрешимо. После определения функции $\tau_2(y)$, из функционального соотношения (14) находим $\nu_2^+(y)$, а также из (13) однозначно определяется функция $f_2(y)$. Следовательно, решение обратной задачи IP можно будет восстановить и в областях Ω_1 и Ω_2 , как решение задачи Коши, а в области Ω_1 как решение первой краевой задачи [8, 10]. Так как, искомые функции являются решениями нелинейных интегральных уравнений, для которых, с помощью принципа сжимающих отображений найдены условия

однозначной разрешимости, из полученного результата также следует единственность решения поставленной задачи. \square

References

- [1] Kilbas A.A., Srivastava H.M., Trujillo J.J., *Theory and applications of fractional differential equations*. // North-Holland Mathematics Studies, **204**. Elsevier Science B. V., Amsterdam, 2006.
- [2] Bakhtiyor J. Kadirkulov, *Boundary problems for mixed parabolic-hyperbolic equations with two lines of changing type and fractional derivative*. // Electronic Journal of Differential Equations, **2014 (57)**, (2014). pp. 1–7.
- [3] O. Kh. Abdullaev, *A Nonlocal Problem with an Integral Matching Condition for a Loaded Parabolic-Hyperbolic Equation with a Fractional Caputo Derivative*. // Differential Equations, **59(3)**. pp. 351–358 (2023).
- [4] O. Kh. Abdullaev, *Solvability of BVPs for the parabolic-hyperbolic equation with non-linear loaded term*. // Journal of Siberian Federal University. Mathematics and Physics **14(2)**, (2021). pp. 133–145
- [5] O.Kh. Abdullaev, *Boundary Value Problems for a Parabolic-Hyperbolic Equation with Nonlinear Loaded Terms*. Lobachevskii Journal of Mathematics, **44:10** (2023). pp. 4205–4214
- [6] O.Kh. Abdullaev, T. K. Yuldashev, *Inverse Problems for the Loaded Parabolic-Hyperbolic Equation Involves Riemann–Liouville Operator* Lobachevskii Journal of Mathematics **44(3)**, (2023). pp. 1080–1090
- [7] O. Kh. Abdullaev, O. Sh. Salmanov, and T. K. Yuldashev, *Direct and inverse problems for a parabolic-hyperbolic equation involving Riemann–Liouville derivatives*, // Trans. Natl. Acad. Sci. Azerb., Ser. Phys.-Tech. Math. Sci.—Math. **43**, (2023), pp. 21–33
- [8] Pskhu A.V., *Uravneniya v chastnykh proizvodstnykh drobnogo poryadka (Fractional Partial Production Equations)*, // Moscow: Nauka, 2005.
- [9] Dzhuraev T.D., Mamazhanov M, *On the correct formulation of boundary value problems for one class of third-order equations of parabolic-hyperbolic type*, // Differential Equations. V. **19 (1)**, (1983), pp. 37–50.
- [10] Mamchuev M.O., *Solutions of the Main Boundary Value Problems for the Time-Fractional Telegraph Equation by the Green Function Method*, Fract. Calc. Appl. Anal. Vol. **20**, No 1, (2017), pp. 190–211.

OBIDJON ABDULLAEV

ALFRAGANUS UNIVERSITY, V.I. ROMANOVSKIY INSTITUTE OF MATHEMATICS

YUKORI KARAKAMISH STREET 2A, YUNUSABAD DISTRICT,

100190, TASHKENT, UZBEKISTAN

E-mail address: obidjon.mth@gmail.com