

СЫЗЫҚТЫ ИНТЕГРО-ДИФФЕРЕНЦИАЛДЫҚ КЕЛЬВИН-ФОЙГТ ЖҮЙЕСІ ҮШІН КЕРІ ЕСЕП

Шәкір Айдос Ғанижанұлы

әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті

математика кафедрасының аға оқытушысы, PhD

3 қазан 2025
Алматы, Қазақстан



Дәрістің мақсаты – сызықты интегро-дифференциалдық теңдеулер жүйесі үшін қойылған кері есептің шешімінің бар болуы мен жалғыздығын дәлелдеу

Негізгі сұрақтар:

- 1 Сызықты интегро-дифференциалдық теңдеулер жүйесі үшін қойылған кері есептің әлсіз қойылымы
- 2 Сызықты интегро-дифференциалдық теңдеулер жүйесі үшін қойылған кері есепке эквивалентті локалды емес тура есеп
- 3 Локалды емес тура есептің әлсіз және әлді шешімінің бар болуы
- 4 Локалды емес тура есептің әлсіз және әлді шешімінің жалғыздығы



Бұл дәріс алдыңғы 3-4 дәрістерде қарастырылған кері есебінің дербес жағдайы, нақтырақ айтқанда, теңдеулер жүйесінде конвективті мүшесі болмағанда уақыт бойынша глобалды әлсіз және әлді шешімдерінің бар болуы мен жалғыздығы дәлелденеді. Жоғарыда қарастырылған кері есептің сызықты жағдайда глобалды шешімдерінің бар болуы мен жалғыздығы [1, 2] жұмыстарда зерттелінді. Алайда, қарастырылып отырған кері есептердің уақыт бойынша глобалды әлсіз және әлді шешімдерінің бар болуы есептің берілгендеріне шектеу қою арқылы тұжырымдалады.



Khompysh K., Shakir A.G.

Time dependent inverse source problems for integrodifferential Kelvin–Voigt system // In: Ruzhansky M., Van Bockstal K. (eds) *Extended Abstracts 2021/2022. APDEGS 2021. Trends in Mathematics*, vol. 2. – Cham: Birkhäuser, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-42539-4_21



Khompysh K., Shakir A.G.

Inverse problems for Kelvin–Voigt system with memory: global existence and uniqueness // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. – 2023. – Vol. 44. – P. 4348–4359. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995080223100232>



Есептің қойылымы

Айталық, $\Omega \subset \mathbb{R}^d$, $d \geq 2$ шенелген облыс және оның $\partial\Omega$ жатық шекарасы болсын. $\Gamma_T = \partial\Omega \times [0, T]$ бүйір бетімен анықталған $Q_T = \Omega \times [0, T]$, $T > 0$ цилиндрінде $(\mathbf{u}(\mathbf{x}, t), p(\mathbf{x}, t), f(t))$ функциялар үштігін анықтауға арналған, сығылмайтын тұтқыр серпімді сұйықтықтардың ағынын сипаттайтын

$$\mathbf{u}_t - \kappa \Delta \mathbf{u}_t - \nu \Delta \mathbf{u} - \int_0^t K(t-s) \Delta \mathbf{u}(\mathbf{x}, s) ds - \nabla p = f(t) \mathbf{g}(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

интегро-дифференциалдық Кельвин-Фойгт теңдеулер жүйесін,

$$\operatorname{div} \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = 0, \quad (\mathbf{x}, t) \in Q_T \quad (2)$$

сығылмайтын сұйықтық теңдеуін,

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, 0) = \mathbf{u}_0(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \Omega \quad (3)$$

бастапқы шартын,

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = 0, \quad (\mathbf{x}, t) \in \Gamma_T \quad (4)$$

сырғанау шекаралық шартын және

$$\int_{\Omega} \mathbf{u} \omega d\mathbf{x} = e(t), \quad t \in [0, T] \quad (5)$$

қосымша шартты қанағаттандыратын кері есепті қарастырайық,



мұндағы $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = (u_1, u_2, \dots, u_d)$ – сұйықтың жылдамдығы мен $p(\mathbf{x}, t)$ – сұйықтың қысымы, ал ν және χ оң сандары, сәйкесінше, сұйықтың кинематикалық тұтқырлық және релаксациясының коэффициенттері, $\mathbf{F}(\mathbf{x}, t) := f(t)\mathbf{g}(\mathbf{x}, t)$ вектор функциясы сыртқы күштердің тығыздығын, ал $f(t)$ сыртқы күштердің интенсивтілігін сипаттайды. Сондай-ақ, $\mathbf{u}_0(\mathbf{x})$, $\boldsymbol{\omega}(\mathbf{x})$, $\mathbf{g}(\mathbf{x}, t)$, $e(t)$, $K(t)$ белгілі функциялар.



Definition

(1)-(5) кері есебінің әлсіз шешімі деп

- 1 $\mathbf{u} \in \mathbf{L}^\infty(0, T; \mathbf{V}) \cap \mathbf{L}^2(0, T; \mathbf{V})$, $\mathbf{u}_t \in \mathbf{L}^2(0, T; \mathbf{V})$, $f(t) \in L^2[0, T]$;
- 2 Ω —да барлық дерлік жерде $\mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0$ бастапқы шартты;
- 3 Кез келген $\boldsymbol{\varphi} \in \mathbf{V}$ және барлық $t \in (0, T)$ үшін төмендегі интегралдық тепе-теңдікті

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left((\mathbf{u}(t), \boldsymbol{\varphi})_{2,\Omega} + \kappa (\nabla \mathbf{u}(t), \nabla \boldsymbol{\varphi})_{2,\Omega} \right) + \nu (\nabla \mathbf{u}(t), \nabla \boldsymbol{\varphi})_{2,\Omega} = \\ f(t) (\mathbf{g}(t), \boldsymbol{\varphi})_{2,\Omega} - \int_0^t K(t-s) (\nabla \mathbf{u}(s), \nabla \boldsymbol{\varphi})_{2,\Omega} ds. \end{aligned} \quad (6)$$

қанағаттандыратын $(\mathbf{u}(\mathbf{x}, t), f(t))$ функциялар жұбын атайды.



Definition

(1)-(5) кері есебінің әлді шешімі деп

- 1 $\mathbf{u} \in \mathbf{L}^\infty(0, T; \mathbf{V} \cap \mathbf{H}^2(\Omega)) \cap \mathbf{L}^2(0, T; \mathbf{V} \cap \mathbf{H}^2(\Omega)), \mathbf{u}_t \in \mathbf{L}^2(0, T; \mathbf{H}^2(\Omega)), f(t) \in L^2[0, T];$
- 2 әрбір теңдеуді сәйкес облыстарда барлық дерлік жерде қанағаттандыратын $(\mathbf{u}(\mathbf{x}, t), f(t))$ функциялар жұбын атайды.

Әдеттегідей, әлсіз шешімінің анықтамасында p қысым туралы мағлұмат келтірілмеген. Оны [1] мақаладағыдай $\mathbf{u}$ және f функциялары белгілі болғаннан кейін де Рамм леммасын қолданып, (2) теңдеуден бірімәнді қалпына келтіруге болады.



S.N. Antontsev, H.B. de Oliveira, Kh. Khompysh.

The classical Kelvin-Voigt problem for nonhomogeneous and incompressible fluids: existence, uniqueness and regularity. Nonlinearity 34 (2021), no. 5, 3083–3111.



Айталық, есептердің берілгендері келесі шарттарды қанағаттандырсын дейік.

$$u_0(x) \in V; \quad (7)$$

$$\exists k_0 \in \mathbb{R} : 0 < k_0 < \infty, \quad |g_0(t)| = |(g(t), \omega)_{2,\Omega}| \geq k_0 > 0, \quad \forall t \geq 0; \quad (8)$$

$$g(x, t) \in L^\infty(0, T; L^2(\Omega)); \quad (9)$$

$$\omega(x) \in V, \quad e(t) \in W_2^1([0, T]); \quad (10)$$

$$(u_0, \omega)_{2,\Omega} = e(0); \quad (11)$$

$$K(t) \in L^2([0, T]) : \quad \|K(t)\|_{L^2([0, T])} \equiv K_0 < \infty. \quad (12)$$



Енді (1) теңдеуді $\omega(\mathbf{x})$ функциясына көбейтіп және Ω облыс бойынша интегралдайық. Алынған өрнекті бөліктеп интегралдап, сондай-ақ (5) қосымша және (8) шартты қолдансақ, онда $f(t)$ функциясы келесі түрде анықталады

$$f(t) = \frac{1}{g_0(t)} \left(e'(t) + \kappa (\nabla \mathbf{u}_t(t), \nabla \omega)_{2,\Omega} + \nu (\nabla \mathbf{u}(t), \nabla \omega)_{2,\Omega} + \int_0^t K(t-s) (\nabla \mathbf{u}(s), \nabla \omega)_{2,\Omega} ds \right) := F_1(\mathbf{u}, t). \quad (13)$$

Мұнан соң, (13) өрнекті (1) теңдеуге қойғансақ, онда белгісіз $\mathbf{u}$ және p функцияларын табуға арналған

$$\mathbf{u}_t - \kappa \Delta \mathbf{u}_t - \nu \Delta \mathbf{u} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \int_0^t K(t-s) \Delta \mathbf{u}(s) ds - \nabla p = F_2(\mathbf{u}, t) \mathbf{g}(\mathbf{x}, t), \quad \operatorname{div} \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = 0, \quad (\mathbf{x}, t) \in Q_T, \quad (14)$$

теңдеулер жүйесін, (3) бастапқы және (4) шекаралық шарттарды қанағаттандыратын локалды емес тура есеп алынады, мұндағы $F_1(\mathbf{u}, t) = f(t)$ функциясы (13) өрнекпен анықталады. Демек, (1)-(5) кері есебін, сәйкесінше, (14), (3)-(4) локалды емес тура есепке алып келдік.



Кері есеп пен локалды емес тура есептің эквиваленттілігі жөнінде келесі лемма орынды.

Lemma

Айталық, (8)-(11) шарттар орындалсын. Демек, (1)-(5) кері есебі (14), (3)-(4) локалды емес тура есебіне эквивалентті, яғни (u, p, f) функциялары (1)-(5) кері есебінің шешімі болса, онда (u, p) жұбы (14), (3)-(4) локалды емес тура есебінің шешімі болып табылады және керісінше, (u, p) функциялары (14), (3)-(4) локалды емес тура есебінің шешімі болса, онда ол (13) өрнекпен анықталған $f(t)$ функциясымен бірге (1)-(5) кері есебінің шешімін береді.

(14), (3)-(4) локалды емес тура есебінің әлсіз және әлді шешімінің анықтамасы 1 және 2-анықтамаға ұқсас түрде беріледі. 3-дәрістегі 1.1-леммаға аналогты түрде дәлелденеді.



Енді (14), (3)-(4) тура есебінің әлсіз шешімінің бар болуы туралы келесі теорема орынды.

Theorem

Айталық, (7)-(12) ұйғарымдары және қандай да бір m оң саны табылып келесі шарт орындалсын

$$\frac{\gamma}{k_0^2} \sup_{t \in [0, T]} \|g(t)\|_{2, \Omega}^2 \|\omega\|_{\mathbf{V}}^2 \leq m < 2. \quad (15)$$

орындалсын. Онда Q_T цилиндрінде (14), (3)-(4) тура есебінің $u(x, t)$ әлсіз шешімі бар болады, сонымен бірге 1.1-лемма бойынша оған эквивалентті (1)-(5) кері есебінің әлсіз шешімі табылады және ол барлық $t \in (0, T]$ үшін келесі бағалауды қанағаттандырады

$$\|u\|_{L^\infty(0, T_1; L^2(\Omega) \cap \mathbf{V})}^2 + \|u\|_{L^2(0, T_1; \mathbf{V})}^2 + \|u_t\|_{L^2(0, T_1; L^2(\Omega) \cap \mathbf{V})}^2 \leq C, \quad (16)$$

мұндағы C есептің берілгендерінен тәуелді тұрақты.



Соңғы тұжырым аналогты түрде 3-дәрістегі (1.1)-(1.5) кері есебінің шешімділігі секілді (1)-(5) кері есебі үшін де дәлелденеді. Нақтырақ айтқанда, (14), (3)-(4) тура есебінің әлсіз шешімі барлық $t \in (0, T]$ үшін (16) априорлық бағалауды қанағаттандыратын көрсету жеткілікті. Ал дәлелдеу алгоритмі 3-дәрістегі 1.1-теореманың дәлелдеуі секілді жүргізіледі.

Демек, конвективті мүше болмаған жағдайда 3-дәрістегі (1.25) және (1.26) өрнектерін ескеріп және оларды біріктірсек, онда

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \left(\|\mathbf{u}^n(t)\|_{2,\Omega}^2 + (\nu + \varkappa) \|\mathbf{u}^n(t)\|_{\mathbf{V}}^2 \right) + \nu \|\mathbf{u}^n(t)\|_{\mathbf{V}}^2 + \\ & \|\mathbf{u}_t^n(t)\|_{2,\Omega}^2 + \varkappa \|\mathbf{u}_t^n(t)\|_{\mathbf{V}}^2 = - \int_0^t K(t-s) (\nabla \mathbf{u}^n(s), \nabla \mathbf{u}^n(t))_{2,\Omega} ds - \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & \int_0^t K(t-s) (\nabla \mathbf{u}^n(s), \nabla \mathbf{u}_t^n(t))_{2,\Omega} ds + F_2(\mathbf{u}, t) (\mathbf{g}(t), \mathbf{u}_t^n(t))_{2,\Omega} + \\ & F_2(\mathbf{u}^n, t) (\mathbf{g}(t), \mathbf{u}^n(t))_{2,\Omega}. \end{aligned}$$

теңдігі алынады, мұндағы $F_2(\mathbf{u}^n, t)$ функционалы үшін

$$\begin{aligned} |F_2(\mathbf{u}^n, t)| & \leq \frac{1}{k_0} [|e'(t)| + \varkappa \|\mathbf{u}_t^n\|_{\mathbf{V}} \|\omega\|_{\mathbf{V}} + \\ & \nu \|\mathbf{u}^n\|_{\mathbf{V}} \|\omega\|_{\mathbf{V}} + \|\omega\|_{\mathbf{V}} K_0 \left(\int_0^t \|\mathbf{u}^n(s)\|_{\mathbf{V}}^2 ds \right)^{\frac{1}{2}}]. \end{aligned} \quad (18)$$



бағалауын қанағаттандырады. Соңғы (17) теңдіктің оң жағын бағалау үшін бірінші және екінші қосылғыштарға, сәйкесінше, 3-дәрістегі (1.28) және (1.29) бағалауларды қолданып, ал үшінші және төртінші қосылғыштарын, сәйкесінше, 3-дәрістегі (1.30) және (1.31) бағалауларын негізге ала отырып (18) өрнекті бірге ескеріп бағалағанда

$$z(t) := 1 + \|\mathbf{u}^n(t)\|_{2,\Omega}^2 + (\nu + \varkappa) \|\mathbf{u}^n(t)\|_{\mathbf{V}}^2$$

функциясы үшін келесі дифференциалдық теңсіздік шығады

$$\begin{aligned} z'(t) + \nu \|\mathbf{u}^n(t)\|_{\mathbf{V}}^2 + \alpha \|\mathbf{u}_t^n(t)\|_{2,\Omega}^2 + \beta \|\mathbf{u}_t^n(t)\|_{\mathbf{V}}^2 \leq \\ C_1 \int_0^t z(s) ds + C_2 z(t) + C_3(t), \end{aligned} \quad (19)$$

мұндағы

$$\alpha := 2 \left(1 - \frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{2} \right); \quad \beta := 2 \left(\varkappa - \frac{\varepsilon_1}{2} - \frac{\varkappa^3}{\varepsilon_2 k_0^2} \sup_{t \in [0, T]} \|\mathbf{g}(t)\|_{2,\Omega}^2 \|\omega\|_{\mathbf{V}}^2 \right);$$

$$C_1 := \frac{1}{\nu + \varkappa} \left(\frac{K_0^2}{\nu} + \frac{2K_0^2}{\varepsilon_1} + \frac{2K_0^2}{\varepsilon_3 k_0^2} \sup_{t \in [0, T]} \|\mathbf{g}(t)\|_{2,\Omega}^2 \|\omega\|_{\mathbf{V}}^2 \right);$$

$$C_2 := \frac{1}{\nu + \varkappa} \left(\varepsilon_3 + \varepsilon_2 + \frac{2\nu^2}{\varepsilon_3 k_0^2} \sup_{t \in [0, T]} \|\mathbf{g}(t)\|_{2,\Omega}^2 \|\omega\|_{\mathbf{V}}^2 \right);$$

$$C_3(t) := \frac{2}{\varepsilon_3 k_0^2} \sup_{t \in [0, T]} \|\mathbf{g}(t)\|_{2,\Omega}^2 |e'(t)|^2.$$



Енді $\varepsilon_2 = \frac{2e^\varepsilon - 1}{e^\varepsilon}$; $\varepsilon_3 = \frac{\sin \varepsilon}{e^\varepsilon}$; $\varepsilon \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$ таңдасақ және ε_1 —дің сәйкес мәні үшін $\frac{\varkappa}{k_0^2} \sup_{t \in [0, T]} \|\mathbf{g}(t)\|_{2, \Omega}^2 \|\omega\|_{\mathbf{V}}^2 \leq m < 2$ теңсіздігінің жоғарғы шекарасын m —нен 2—ге дейін кеңейтуге болады. Алайда, ε_1 саны $m > 2$ болатындай таңдалмауы керек, себебі $\alpha > 0$ болғандығынан $\varepsilon_2 < 2$.
Енді (19) өрнекті s бойынша 0—ден t —ға шейін интегралдап, 3-дәрістегі (1.24) өрнекті қолдансақ, келесі интегралдық теңсіздік шығады

$$z(t) + \nu \|\mathbf{u}^n\|_{L^2(0, T; \mathbf{V})}^2 + \alpha \|\mathbf{u}_t^n\|_{L^2(Q_T)}^2 + \beta \|\mathbf{u}_t^n\|_{L^2(0, T; \mathbf{V})}^2 \leq C_5 \int_0^t z(s) ds + C_6, \quad (20)$$

мұндағы

$$C_4 = C_1 T + C_2; \quad C_5 = 1 + \|\mathbf{u}_0\|_{2, \Omega}^2 + (\varkappa + \nu) \|\mathbf{u}_0\|_{\mathbf{V}}^2 + \int_0^t C_3(s) ds.$$

Сөйтіп, (20) өрнектің сол жағындағы екінші, үшінші және төртінші қосылғыштарды ескермей сызықты Гронуолл теңсіздігін қолданғанда

$$z(t) \leq C_5 e^{C_4 T} \quad (21)$$

бағалауы тұжырымдалады.



гер (21) бағалауды (20) өрнектің оң жағына ескеріп, сондай-ақ, екі жағынан $t \in [0, T]$ бойынша супремум алсақ, онда келесі әлсіз шешім үшін априорлық бағалау қорытылады

$$\begin{aligned} & \sup_{t \in [0, T]} \|\mathbf{u}^n(t)\|_{2, \Omega}^2 + (\nu + \varkappa) \sup_{t \in [0, T]} \|\mathbf{u}^n(t)\|_{\mathbf{V}}^2 + \nu \|\mathbf{u}^n\|_{L^2(0, T; \mathbf{V})}^2 + \\ & \alpha \|\mathbf{u}_t^n\|_{L^2(Q_T)}^2 + \beta \|\mathbf{u}_t^n\|_{L^2(0, T; \mathbf{V})}^2 \leq M := M(T, C_4, C_5). \end{aligned} \quad (22)$$



Theorem

Айталық, 4-теореманың барлық шарттары орындалсын. Сонымен қатар, 3-дәрістегі (1.49) шарт орынды болсын. Онда (14), (3)-(4) тура есебінің әлді шешімі бар болады сонымен бірге 1.1-лемма бойынша оған эквивалентті (1)-(5) кері есебінің әлді шешімі табылады және ол барлық $t \in (0, T]$ үшін 3-дәрістегі (1.73) бағалауды қанағаттандырады.



Бұл теорема дәлелдеу үшін (14), (3)-(4) тура есебінің әлді шешімі барлық $t \in (0, T]$ үшін 3-дәрістегі (1.50) априорлық бағалауды қанағаттандыратын көрсету жеткілікті. Дәлелдеу алгоритмі 3-дәрістегі 1.2-теореманың дәлелдеуіне ұқсас түрде жүргізіледі. Демек, 3-дәрістегі (1.52) өрнегіне аналогты энергетикалық теңдік келесі түрде болады

$$\begin{aligned} & \frac{\nu}{2} \frac{d}{dt} \left\| \tilde{\Delta} \mathbf{u}^n(t) \right\|_{2,\Omega}^2 + \varkappa \left\| \tilde{\Delta} \mathbf{u}_t^n(t) \right\|_{2,\Omega}^2 + \left\| \mathbf{u}_t^n(t) \right\|_{\mathbf{V}}^2 = \\ & - \int_0^t K(t-s) \left(\tilde{\Delta} \mathbf{u}^n(s), \tilde{\Delta} \mathbf{u}_t^n(t) \right)_{2,\Omega} ds + F_2(\mathbf{u}^n, t) \left(\mathbf{g}, -\tilde{\Delta} \mathbf{u}_t^n(t) \right)_{2,\Omega}, \end{aligned} \quad (23)$$

Енді (23) оң жағын бағалау үшін Гельдер және Юнг теңсіздіктерін (18) өрнекпен бірге қолданғанда

$$\begin{aligned} & \nu \frac{d}{dt} \left\| \tilde{\Delta} \mathbf{u}^n(t) \right\|_{2,\Omega}^2 + \varkappa \left\| \tilde{\Delta} \mathbf{u}_t^n(t) \right\|_{2,\Omega}^2 + \left\| \mathbf{u}_t^n(t) \right\|_{\mathbf{V}}^2 \leq \\ & \frac{2}{\varkappa} \left[K_0^2 \int_0^t \left\| \tilde{\Delta} \mathbf{u}^n(s) \right\|_{2,\Omega}^2 ds + |F_2|^2 \left\| \mathbf{g}(t) \right\|_{2,\Omega}^2 \right]. \end{aligned} \quad (24)$$



Сөйтіп, (24) өрнекті s бойынша 0—ден t —ға шейін интегралдап және әлсіз шешім үшін алынған априорлық бағалауларды ескерсек, онда төмендегі интегралдық теңсіздік алынады

$$\nu \|\Delta \mathbf{u}^n(t)\|_{2,\Omega}^2 + \varkappa \int_0^t \|\tilde{\Delta} \mathbf{u}_t^n(s)\|_{2,\Omega}^2 ds \leq C_7 + C_8 \int_0^t \nu \|\tilde{\Delta} \mathbf{u}^n(s)\|_{2,\Omega}^2 ds, \quad (25)$$

мұндағы

$$C_7 := \nu \|\tilde{\Delta} \mathbf{u}_0\|_{2,\Omega}^2 + \frac{3}{\varkappa} \|\mathbf{g}\|_{L^\infty(0,T;L^2(\Omega))}^2 \int_0^T |F_2(s)|^2 ds < \infty,$$

$$C_8 := \frac{2}{\nu \varkappa} K_0^2 T < \infty.$$

Демек, (25) өрнекке Гронуолл теңсіздігін ескерсек, онда келесі бағалау алынады

$$\|\tilde{\Delta} \mathbf{u}^n(t)\|_{2,\Omega}^2 \leq \frac{1}{\nu} C_7 e^{C_8 T}, \quad \forall t \in (0, T) \quad (26)$$

Егер (25) өрнектің екі жағынан $t \in [0, T]$ бойынша супремум алып және (26) бағалауды қолдансақ, онда төмендегі бағалау тұжырымдалады

$$\sup_{t \in [0, T]} \|\tilde{\Delta} \mathbf{u}^n(t)\|_{2,\Omega}^2 + \|\tilde{\Delta} \mathbf{u}_t^n\|_{L^2(Q_T)}^2 \leq C := C(\nu, \varkappa, C_7, C_8, T) < \infty. \quad (27)$$



(1)-(5) кері есебінің жалғыздығы туралы келесі теорема орынды.

Theorem

Айталық, 4-теореманың шарттары орындалсын. Онда (14), (3)-(4) есебінің әлсіз (әлді) шешімі жалғыз болады.

Бұл тұжырымның дәлелдеуі 3-дәрістегі 1.3-теореманың дәлелдеуіне аналогты түрде тұжырымдалады, сондықтан дәлелдеусіз қалдырдық.



НАЗАРЛАРЫҢЫЗҒА
РАҚМЕТ!

