МРНТИ 27.31.17: 27.31.44
УДК 517.956

10.51889/2959-5894.2023.82.2.002

С.Е. Айтжанов[1,2*]*, А.Е. Марат*[3]

[1]*Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан*
[2]*Математика және математикалық модельдеу институты, Алматы қ., Қазақстан*
[3]*Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан*
[*]*e-mail: aitzhanov.serik81@gmail.com*

ӨЗГЕШЕЛЕНЕТІН ҮШІНШІ РЕТТІ ДИФФЕРЕНЦИАЛДЫҚ ТЕҢДЕУДІҢ ШЕШІМДІЛІГІ

Аңдатпа

Айнымалы типтегі теңдеулер үшін шеттік есептер классикалық зерттеу объектілерінің бірі болып табылады. Жұмыста айнымалы типтегі теңдеулер үшін шеттік есептердің шешімділігізерттелген. Айнымалы типті теңдеулердің практикалық маңыздылығы ерекше. Сонымен қатар, олардың зерттеуі математиканың әртүрлі салаларының атап айтар болсақ, дербес туындылы дифференциалдық теңдеулер теориясында, функционалдық талдау теориясының дамуымен байланысты. Берілген жұмыстың мақсатыайнымалы типті теңдеу үшін шеттік есептің шешімділігін зерттеу болып табылады. Айнымалы типті теңдеудің шешімділігін регуляризация әдісі, Гельдер, Юнг теңсіздіктері және априорлық бағалау әдістерін пайдалану арқылы дәлелденген. Сонымен бірге, бұл жұмыстаквазисызықты мүшесі теңдеудің сол жағында болған жағдай үшін де шеттік есептің регулярлы шешімі бар және жалғыздығы дәлелденген. Айнымалы типтегі теңдеулерге арналған шеткі есептер ғылымның көптеген салаларында қолданылады, физиканың кванттық электроника, плазма физикасы, ядролық физика салаларында, сондай-ақ айнымалы типті теңдеуге мысал болатын Келдыш теңдеуі ұшақ құрастыру есептеулерімен тығыз байланысты болса, Трикоми есебі газодинамика саласына өз септігін тигізді. Сонымен қатар, механика, геофизика, химия, молекулалық биология, ғылым салаларында қолданысы бар.

Түйін сөздер: өзгешеленетін теңдеу, шеттік есеп, регуляризация әдісі, Гельдер, Юнг теңсіздіктері, априорлық бағалау.

Аннотация

С.Е. Айтжанов[1,2]*, А.Е. Марат*[3]
[1]*Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан*
[2]*Институт математики и математического моделирования, г. Алматы, Казахстан*
[3]*Казахский национальный педагогический университет имени Абая, г. Алматы, Казахстан*

РАЗРЕШИМОСТЬ ВЫРОЖДАЮЩЕГОСЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА

Краевые задачи для уравнений переменного типа являются одним из классических объектов исследования. В работе исследована разрешимость краевых задач для уравнений переменного типа. Уравнения переменного типа имеют особое практическое значение. Кроме того, их исследования связаны с развитием различных разделов математики, в частности, теории дифференциальных уравнений в частных производных, теории функционального анализа. Цель работы заключается в исследовании разрешимости краевой задачи для уравнения переменного типа. Разрешимость уравнения переменного типа доказана с помощью метода регуляризации, неравенств Гельдера, Юнга и методов априорного оценивания. В то же время в работе доказана регулярное решения и единственность краевой задачи даже для случая, когда квазилинейное слагаемое находится в левой части уравнения. Краевые задачи для уравнений переменного типа используются во многих областях науки, в области физики, квантовой электроники, физики плазмы, ядерной физики, а также уравнение Келдыша, являющееся примером уравнения переменного типа, тесно Проблема Трикоми, связанная с расчетами конструкции самолетов, внесла свой вклад в область газовой динамики. Кроме того, он используется в области механики, геофизики, химии, молекулярной биологии и естественных наук.

Ключевые слова: вырождающее уравнение, краевые задачи, метод регуляризации, неравенства Гельдера и Юнга, априорная оценка.

Abstract

SOLVABILITY OF A DEGENARATINGTHIRD ORDER DIFFERENTIAL EQUATION

Aitzhanov S.E. [1,2], Marat A.E. [3]
[1]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
[2]Institute of Mathematics and Mathematical Modeling, Almaty, Kazakhstan
[3]Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

Boundary value problems for equations of variable type are one of the classical objects of research. The work investigates the solvability of boundary value problems for equations of variable type. Equations of variable type have special practical significance. In addition, their research is related to the development of various branches of mathematics, in particular, the theory of partial differential equations and the theory of functional analysis. The purpose of this workconsists in studying the solvability of a boundary value problem for an equation of variable type. The solvability of an equation of variable type is proven using the regularization method, Hölder and Young inequalities and a priori estimation methods. At the same time, this work proves the regularity of the solution and the uniqueness of the boundary value problem even for the case when thequasilinearterm is on the left side of the equation. Boundary value problems for equations of variable type are used in many fields of science, in the field of physics, quantum electronics, plasma physics, nuclear physics, and the Keldysh equation, which is an example of an equation of variable type, closely Tricomi problem associated with aircraft design calculations has contributed to field of gas dynamics. In addition, it is used in the fields of mechanics, geophysics, chemistry, molecular biology and natural sciences.

Keywords: degenerating equation, boundary value problems, regularization method, Hölder and Young inequalities, a priori estimation.

Кіріспе

Айнымалы типті екінші ретті және жоғары ретті өзгешеленген теңдеулер үшін шекаралық есептер теориясы көптеген авторлардың жұмыстарының өзекті тақырыбы болып табылады [1-7]. Екінші ретті өзгешеленген теңдеулер үшін кейбір нүктелерде шешімдерінің тұрпаты [1-3] жұмыстарында көрсетілген. Соның ішінде, А.И.Кожановтың [1] еңбегінде

$$u_{tt} + \alpha(t)\frac{\partial}{\partial(t)}(\Delta u) + Bu = f(x,t),$$

теңдеуі үшін эллиптилкалық типті шеттік есептердің регулярлы шешімі бар жаңа класстары зерттелген. Мұнда α(t) функциясы нөлге ұмтылып, таңбасын еркіті түрде өзгерте алуы, қарастырылып отырған теңдеулердің ерекшелігі болып табылады. А.И.Кожановтың [2] жұмысында

$$\varphi(t)u_t - \psi(t)\Delta u + c(x,t)u = f(x,t) \qquad (x \in \Omega \subset R^n,\ 0,< t < T)$$

теңдеуге кіретін Соболев бойынша барлық жалпылама туындыларынан тұратын регулярлы шешімдер класында өзгешеленген дифференциалдық теңдеуі үшін шеттік есептің шешімділігі қарастырылған. В.Н. Врагов[3] өзінің еңбегінде қарастырған теңдеулерінің коэффициенттері бойынша белгілі бір шарттарда Соболев типті кеңістікте біртекті N есебінің жалпыланған шешімі бар екендігін дәлелдеген. Сондай ақ, жалпыланған шешім регулярлы екенін көрсеткен. Айнымалы типті, екінші текті, екінші ретті теңдеулер үшін $W_2^l(Q)$, (2≤ l – бүтін, K(0)≤0≤K(T) Соболев кеңістігінде локальді емес шеттік есептің жалпыланған шешімінің тегістігі мен біртекті шешімділігін С.З.Джамаловтың[4-6] жұмысынан көруге болады. Айнымалы типтегі теңдеулерге арналған шеттік есептер газодинамикада, кванттық физикада, геофизика және химияда қолданылады.

Есептің қойылымы. I Шеттік есеп.

$Q_T = \{(x,t): x \in \Omega,\ 0 < t < T\}$ цилиндрі, $\Omega \subset R^n,\ n \geq 1$шектелген облыс, ал $\Gamma = \partial\Omega$жеткілікті тегіс шекарасы, $S = \Gamma \times (0,T)$цилиндрдіңбүйір шекарасы болсын. Келесі $K(x,t), \alpha(t), \beta(t), a(x,t), c(x,t)$ және $f(x,t)$функциялары $x \in \overline{\Omega}, t \in [0,T]$-де анықталған және берілген функциялар, ал L операторын

$$Lv \equiv K(x,t)v_{tt} + \alpha(t)\Delta v_t + \beta(t)\Delta v + a(x,t)v_t + c(x,t)v,$$

теңдігімен анықталатын дифференциалдық оператор болсын (мұндағы Δ - $x_1,...,x_n$ айнымалылары бойынша Лаплас операторы).

$Q_T=\{(x,t): x\in\Omega,\ 0<t<T\}$ цилиндрінде екінші ретті өзгешеленетін псевдоэллипстік теңдеуін

$$Lv\equiv K(x,t)v_{tt}+\alpha(t)\Delta v_t+\beta(t)\Delta v+a(x,t)v_t+c(x,t)v=f(x,t), \tag{1}$$

және шеттік шарттарын

$$v\big|_S=0, \tag{2}$$

$$v(x,0)=0,\ v(x,T)=0,\ x\in\Omega, \tag{3}$$

қанағаттандыратын $v(x,t)$ функциясын анықтау қажет. Мұндағы $\Omega\subset R^n$, $n\ge 1$ шектелген облыс, ал $\Gamma=\partial\Omega$ жеткілікті тегіс шекарасы, $S=\Gamma\times(0,\mathrm{T})$ цилиндрдің бүйір шекарасы болсын. $K(x,t)$, $\alpha(t)$, $\beta(t)$, $a(x,t)$, $c(x,t)$ және $f(x,t)$ функциялары берілген функциялар.

Алдымен, $V(Q_T)$ арқылы келесі жиынды белгілейік:

$$V(Q_T)=\left\{w(x,t): w(x,t)\in L_2\left(0,T;W_2^2(\Omega)\cap \overset{0}{W}{}_2^1(\Omega)\right),\right.$$

$$\left. w_t(x,t)\in L_2\left(0,T;W_2^2(\Omega)\cap \overset{0}{W}{}_2^1(\Omega)\right),\ w_{tt}(x,t)\in L_2(Q_T)\right\}.$$

Бұл кеңістік Банах кеңістігі, оның нормасы келесі түрде жазылады:

$$\|w(x,t)\|_{V(Q_T)}^2=\int_{Q_T}(\Delta w)^2\,dxdt+\int_{Q_T}(\Delta w_t)^2\,dxdt+\int_{Q_T}|\nabla w_t|^2\,dxdt+\int_{Q_T}|w_{tt}|^2\,dxdt.$$

1-Теорема. Есептің берілгендері төмендегі шарттар орындалсын:

$$K(x,t)\in C^1(Q_T),\ \forall(x,t)\in Q_T,\ K(x,t)\ge k_0>0,$$

$$\alpha(t)\in C^1[0,t],\beta(t)\in C^1[0,t],$$

$$\forall t\in[0,T]:\ \beta(t)-\frac{\alpha'(t)}{2}\ge\beta_0>0,$$
$$\forall t\in[0,T]:\ \beta(t)+\alpha'(t)\ge\beta_1>0.$$

$$\alpha(T)\le 0,\ \alpha(0)\ge 0.$$

$$f(x,t),\ f_t(x,t)\in L_2(Q_T),\ f(x,0)=0,\ f(x,T)=0.$$

Онда (1)-(3) есебінің $v\in V(Q_T)$ кеңістігінде шешімі бар және жалғыз.

Дәлелдеуі. Есептің шешімділігін дәлелдеуде регуляризация әдісін қолданамыз. ε – оң сан болсын делік. Q_T цилиндрінде

$$-\varepsilon\left(v_{tttt}+\Delta^2 v\right)+Lv=f, \tag{4}$$

теңдеуі үшін (2) және (3) шарттарды, сонымен қатар

$$\Delta v\big|_S=0, \tag{5}$$

$$v_{tt}(x,0)=0,\ v_{tt}(x,T)=0,\ x\in\Omega, \tag{6}$$

шарттарын қанағаттандыратын шеттік есебін қарастырайық. (4), (2), (3), (5), (6) шеттік есебін шешімділікке зерттейік.

Біріншіден, (4) теңдеуді $\Delta v(x,t)$ функциясына $L_2(Q_T)$ кеңістігінде скаляр көбейтейік:

$$\int\limits_{QT}\left[-\varepsilon\left(v_{tttt}+\Delta^2 v\right)+Lv\right]\Delta v dxdt=\int\limits_{QT} f\,\Delta v dxdt. \tag{7}$$

Соңғы теңдіктің әрбір мүшелерін бөліктеп интегралдайық:

$$-\varepsilon\int\limits_{Q_T} v_{tttt}\Delta v dxdt=-\varepsilon\int\limits_{S} v_{tttt}\nabla v ds+\varepsilon\int\limits_{Q_T}\nabla v_{tttt}\nabla v dxdt=$$

$$=\varepsilon\int\limits_{Q_T}\nabla v_{tttt}\nabla v dxdt=\varepsilon\int\limits_{\Omega}\left[\nabla v_{ttt}\nabla v\Big|_0^T-\int\limits_0^T\nabla v_{ttt}\nabla v_t dt\right]dx=$$

$$=-\varepsilon\int\limits_{\Omega}\left[\nabla v_{tt}\nabla v_t\Big|_0^T-\int\limits_0^T|\nabla v_{tt}|^2\,dt\right]dx=\varepsilon\int\limits_{Q_T}|\nabla v_{tt}|^2\,dxdt.$$

$$-\varepsilon\int\limits_{QT}\Delta^2 v\Delta v dxdt=-\varepsilon\int\limits_{S}\nabla\Delta v\Delta v ds+\varepsilon\int\limits_{QT}|\nabla\Delta v|^2\,dxdt=\varepsilon\left\|\nabla\Delta v\right\|_{2,QT}^2.$$

$$\int\limits_{Q_T}K(x,t)v_{tt}\Delta v dxdt=\int\limits_{\Omega}\left[K(x,t)\Delta v v_t\Big|_0^T-\int\limits_0^T\left(K(x,t)\Delta v\right)_t v_t dt\right]dx=$$

$$=-\int\limits_{\Omega}\int\limits_0^T\left(K_t(x,t)\Delta v+K(x,t)\Delta v_t\right)v_t dxdt=-\int\limits_{Q_T}K_t(x,t)\Delta v v_t dxdt-$$

$$-\int\limits_{Q_T}K(x,t)\Delta v_t v_t dxdt=-\int\limits_{Q_T}K_t(x,t)\Delta v v_t dxdt+$$

$$+\int\limits_{Q_T}\nabla K(x,t)v_t\nabla v_t dxdt+\int\limits_{Q_T}K(x,t)|\nabla v_t|^2\,dxdt.$$

$$\int\limits_{Q_T}\alpha(t)\Delta v_t\cdot\Delta v dxdt=\frac{1}{2}\int\limits_0^T\int\limits_{\Omega}\alpha(t)\frac{\partial}{\partial t}(\Delta v)^2\,dxdt=$$

$$=\frac{1}{2}\int\limits_{\Omega}\left[\alpha(t)(\Delta v)^2\Big|_0^T-\int\limits_0^T\alpha'(t)(\Delta v)^2 dt\right]dx=$$

$$=\frac{1}{2}\int\limits_{\Omega}\left[\alpha(t)(\Delta v)^2\Big|_0^T-\int\limits_0^T\alpha'(t)(\Delta v)^2 dt\right]dx=\frac{1}{2}\int\limits_{\Omega}\alpha(T)\left(\Delta v(x,T)\right)^2 dx-$$

$$-\frac{1}{2}\int\limits_{\Omega}\alpha(0)\left(\Delta v(x,0)\right)^2 dx-\frac{1}{2}\int\limits_{Q_T}\alpha'(t)(\Delta v)^2\,dxdt=-\frac{1}{2}\int\limits_{Q_T}\alpha'(t)(\Delta v)^2\,dxdt.$$

$$\int\limits_{Q_T}f(x,t)\Delta v dxdt=\int\limits_0^T\left[\int\limits_{\partial\Omega}f\nabla v ds-\int\limits_{\Omega}\nabla f\nabla v dx\right]dt=-\int\limits_{Q_T}\nabla f\nabla v dxdt\,\cdot$$

Алынған өрнектерді (7) теңдікке қойсақ:

$$\varepsilon\int\limits_{Q_T}|\nabla v_{tt}|^2\,dxdt+\varepsilon\left\|\nabla\Delta v\right\|_{2,Q_T}^2+\int\limits_{Q_T}K(x,t)|\nabla v_t|^2\,dxdt+$$

$$+\int_{Q_T}\left(\beta(t)-\frac{\alpha'(t)}{2}\right)(\Delta v)^2\,dxdt=\int_{Q_T}K_t(x,t)\Delta v v_t dxdt-\int_{Q_T}\nabla K(x,t)v_t\nabla v_t dxdt-$$
$$-\int_{Q_T}a(x,t)v_t\cdot\Delta v dxdt-\int_{Q_T}c(x,t)v\Delta v dxdt+\int_{Q_T}f(x,t)\Delta v dxdt.$$

Осы теңдікте 1-теореманың шарттарын ескеріп, сонымен бірге, Гельдер және Юнг теңсіздіктерін қолданып, нәтижеде бірінші априорлық бағалауды аламыз

$$\varepsilon\int_{QT}|\nabla v_{tt}|^2\,dxdt+\varepsilon\|\nabla\Delta v\|^2_{2,QT}+k_0\int_{QT}|\nabla v_t|^2\,dxdt+\beta_0\int_{QT}(\Delta v)^2\,dxdt\le C_1\cdot \tag{8}$$

Енді (4) теңдеуді v_{tt} және $-\Delta v_{tt}$ функцияларына $L_2(Q_T)$ скаляр көбейтіп, бөліктеп интегралдайық:

$$\varepsilon\|v_{ttt}\|^2_{2,QT}+\varepsilon\|\Delta v_t\|^2_{2,QT}+\int_{QT}K(x,t)|v_{tt}|^2\,dxdt-$$
$$-\frac{1}{2}\int_{\Omega}\alpha(T)(\nabla v_t(x,T))^2\,dx+\frac{1}{2}\int_{\Omega}\alpha(0)(\nabla v_t(x,0))^2\,dx+\frac{1}{2}\int_{QT}\alpha'(t)(\nabla v_t)^2\,dxdt+$$
$$+\int_0^T\beta'(t)\nabla v\nabla v_t dt+\int_0^T\beta(t)|\nabla v_t|^2\,dt+\int_{QT}a(x,t)v_t v_{tt}dxdt+$$
$$+\int_{QT}c(x,t)vv_{tt}dxdt=\int_{QT}f(x,t)v_{tt}dxdt \tag{9}$$

және

$$\varepsilon\|\nabla v_{ttt}\|^2_{2,Q_T}+\varepsilon\|\nabla\Delta v_t\|^2_{2,Q_T}+\int_{Q_T}K(x,t)(\nabla v_{tt})^2\,dxdt-$$
$$-\frac{1}{2}\int_{\Omega}\left[\alpha(T)(\Delta v_t(x,T))^2-\alpha(0)(\Delta v_t(x,0))^2\right]+\int_{Q_T}\alpha'(t)(\Delta v_t)^2\,dxdt+$$
$$+\int_{Q_T}\beta'(t)\cdot\Delta v\cdot\Delta v_t dxdt+\int_{Q_T}\beta(t)\cdot(\Delta v_t)^2\,dxdt- \tag*{10)}$$
$$-\int_{Q_T}\nabla a\cdot v_t\nabla v_{tt}dxdt-\int_{Q_T}a\nabla v_t\nabla v_{tt}dxdt+$$
$$+\int_{Q_T}\left[\Delta v_t\cdot c_t(x,t)v+c(x,t)v_t\Delta v_t\right]dxdt=\int_{Q_T}f_t\Delta v_t dxdt.$$

(9) бен (10) тепе-теңдіктерде 1-теореманың шарттарын және (8) бағалауды ескеріп, нәтижеде екінші және үшінші априорлық бағалауларды аламыз

$$\varepsilon\|v_{ttt}\|^2_{2,QT}+\varepsilon\|\Delta v_t\|^2_{2,QT}+k_0\int_{QT}|v_{tt}|^2\,dxdt\le C_3. \tag{11}$$

$$\varepsilon\|\nabla v_{ttt}\|^2_{2,Q_T}+\varepsilon\|\nabla\Delta v_t\|^2_{2,Q_T}+k_0\int_{Q_T}(\nabla v_{tt})^2\,dxdt+\alpha_0\int_{Q_T}(\Delta v_t)^2\,dxdt\le C_4. \tag{12}$$

Енді (4) теңдеуді келесі түрде жазайық:

$$\varepsilon\left(v_{tttt}+\Delta^2 v\right)=Lv-f,$$

содан соң, екі жағын квадраттайық та, алынған теңдіктің екі жағын Q_T облысы бойынша интегралдайық:

$$\varepsilon^2\int_{Q_T}\left(v_{tttt}^2+2v_{tttt}\Delta^2 v+(\Delta^2 v)^2\right)dxdt=\int_{Q_T}\left[(Lv)^2-2f\,Lv+f^2\right]dxdt.$$

Соңғы теңдікте 1-теореманың шарттарын және (8), (11), (12) априорлық бағалауларды ескере отырып, нәтижеде бізге қажетті бағалауды аламыз

$$\varepsilon^2\int_{Q_T}\left(v_{tttt}^2+(\Delta^2 v)^2\right)dxdt\le C_5. \tag{13}$$

$\left\{\varepsilon_n\right\}_{n=1}^{\infty}$ тізбегі нөлге ұмтылатын оң сандар тізбегін алайық. $v_n(x,t)$ арқылы (4), (2), (5), (6) шеттік есебінің $\varepsilon=\varepsilon_n$ болғандағы шешімін белгілейік. $\varepsilon=\varepsilon_n$ болғандағы $\left\{v_n\right\}_{n=1}^{\infty}$ тізбегі үшін (8), (10), (12) және (13) априорлық бағалаулар орындалады. Осы бағалаулардан және рефлексивті Гильберт кеңістігінің қасиеттерінен $\left\{v_{n_k}\right\}_{k=1}^{\infty}$ тізбекшесі бар және $v(x,t)$ функциясы $k\to\infty$ ұмтылғанда $\varepsilon_{n_k}\to 0,$

$W_2^{2,2}(Q_T)$ кеңістігінде $v_{n_k}(x,t)\to v(x,t)$ әлсіз жинақталады,

$L_2(Q)$ кеңістігінде $\Delta v_{n_k t}(x,t)\to\Delta v_t(x,t)$ әлсіз жинақталады,

$L_2(Q)$ кеңістігінде $\varepsilon_{n_k}v_{n_k tttt}(x,t)\to 0$ әлсіз жинақталады,

$L_2(Q)$ кеңістігінде $\varepsilon_{n_k}\Delta^2 v_{n_k}(x,t)\to 0$ әлсіз жинақталады.

Бұлардан $v(x,t)$ функциясы $V(Q_T)$ кеңістігіне тиісті болатындығы және оның (1)-(3) шеттік есептің шешімі болады. Ал, (1)-(3) шеттік есептің $V(Q_T)$ кеңістігінде шешімнің жалғыздығы (8) бағалаудан шығады, $f(x,t)\equiv 0$ жағдайында $v(x,t)\equiv 0$ екендігі шыққандықтан, ал есептің сызықтығынан есептің шешімінің жалғыздығы шығады.

II шеттік есебі. Q_T цилиндрінде

$$K(x,t)v_{tt}+\alpha(t)\Delta v_t+\beta(t)\Delta v+M\left(\|\nabla v\|_{L_2(\Omega)}^2\right)\Delta v+a(x,t)v_t+c(x,t)v=f(x,t), \tag{13}$$

теңдеуін және келесі шеттік шарттарын

$$v\big|_S=0, \tag{14}$$

$$v(x,0)=0,\ v(x,T)=0,\ x\in\Omega, \tag{15}$$

қанағаттандыратын регуляр $v(x,t)$ функциясын табу.

2-Теорема. Айталық, 1-теореманың шарттарымен қоса

$$M(\xi)\in C^1(R),\ \forall\xi\ge 0: M(\xi)\ge m_0>0,$$

теңсіздіктері орындалсын, онда (13)-(15) есебінің $v \in V(Q_T)$ кеңістігінде шешімі бар және жалғыз. Бұл теореманың дәлелдеуі де, (1)-(3) шеттік есебін шешімділікке зерттеген кездегі регуляризация әдісін қолдану арқылы дәлелденеді.

Қорытынды

Осы жұмыста алынған айнымалы типті теңдеу үшін шеттік есептің бірмәнді шешімділігі регуляризация әдісі арқылы дәлелденді. Айнымалы типті теңдеулерді тереңдетіп зерттеу нәтижесі ғылымның көптеген салаларында қолданысқа ие болады, атап айтсақ: физиканың кванттық теориясында, плазма физикасында, ядролық физика салаларында, газодинамика саласында, механика, геофизика, химия, молекулалық биология, ғылым салаларында дамуына үлес қосады.

Алғыс

Бірінші авторды Қазақстан Республикасы Ғылым және Жоғары білім министрлігінің (Грант № AP19678182) фундаменталді гранты бойынша қаржыландырылды.

Пайдаланылған әдебиеттер тізімі:

1 Кожанов А.И. Краевые задачи для псевдоэллиптических уравнений третьего порядка с вырождением. Математические заметки СВФУ. 2020. Т. 27, № 3.С.19-24. https://doi.org/10.25587/SVFU.2020.63.12.002

2 Кожанов А.И. Мациевская Е.Е., Вырождающиеся параболические уравнения с переменным направлением эволюции. Сибирские электронные математичсекие известия. 2019. Т. 16. С.718-731. https://doi.org/10.33048/semi.2019.16.048

3 Врагов В.Н. Об одной смешанной задаче для вырождающегося эллиптического уравнения первого рода. Сибирский математический журнал. 1975. Т. 16. С.494-500.

4 Джамалов С.З. Об одной нелокальной краевой задаче с постоянными коэффициентами для уравнения смешанного типа второго рода второго порядка в прямоугльнике. Журнал СВМО. 2017. Т. 19,№ 4.С.12-22.

5 Джамалов С.З. Об одной нелокальной краевой задаче для уравнения смешанного типа второго рода второго порядка. Узбекский математический журнал. 2014. Т.1, №1.С. 5-14.

6 Джамалов С.З. О корректности одной нелокальной краевой задачи с постоянным коэффицентом для многомерного уравнения смешанного типа второго порядка. Математические заметки СВФУ. 2017. Т. 24, №4. С.17-27.

7 Aitzhanov S.E., Tileuberdi Zh., Sanat G.Solvability of an initial-boundary value problem for a nonlinear pseudoparabolic equation with degeneration.Bulletin of the Karaganda University. Mathematics Series. 2022, 105(1),P. 4–12. https://rep.ksu.kz//handle/data/13150

References:

1 Kozhanov A.I. Kraevye zadachi dlja psevdojellipticheskih uravnenij tret'ego porjadka s vyrozhdeniem[Boundary value problems for third-order pseudoelliptic equations with degeneracy]. Matematicheskie zametki SVFU. 2020. T. 27, № 3. S.19-24. https://doi.org/10.25587/SVFU.2020.63.12.002

2 Kozhanov A.I. Macievskaja E.E., Vyrozhdajushhiesja parabolicheskie uravnenija s peremennym napravleniem jevoljucii [Degenerating parabolic equations with a variable direction of evolution]. Sibirskie jelektronnye matematichsekie izvestija. 2019. T. 16. S.718-731. https://doi.org/10.33048/semi.2019.16.048

3 Vragov V.N. Ob odnoj smeshannoj zadache dlja vyrozhdajushhegosja jellipticheskogo uravnenija pervogo roda [On a mixed problem for a degenerate elliptic equation of the first kind]. Sibirskij matematicheskij zhurnal. 1975. T. 16. S.494-500.

4 Dzhamalov S.Z. Ob odnoj nelokal'noj kraevoj zadache s postojannymi kojefficientami dlja uravnenija smeshannogo tipa vtorogo roda vtorogo porjadka v prjamougl'nike [On a nonlocal boundary value problem with constant coefficients for a mixed type equation of the second kind of second order in a rectangle]. Zhurnal SVMO. 2017. T. 19, № 4. S.12-22.

5 Dzhamalov S.Z. Ob odnoj nelokal'noj kraevoj zadache dlja uravnenija smeshannogo tipa vtorogo roda vtorogo porjadka [On a nonlocal boundary value problem for a mixed type equation of the second kind of second order]. Uzbekskij matematicheskij zhurnal. 2014. T.1, №1. S. 5-14.

6 Dzhamalov S.Z. O korrektnosti odnoj nelokal'noj kraevoj zadachi s postojannym kojefficentom dlja mnogomernogo uravnenija smeshannogo tipa vtorogo porjadka [On a nonlocal boundary value problem for a mixed type equation of the second kind of second order]. Matematicheskie zametki SVFU. 2017. T. 24, № 4. S.17-27.

7 Aitzhanov S.E., Tileuberdi Zh., Sanat G. Solvability of an initial-boundary value problem for a nonlinear pseudoparabolic equation with degeneration. Bulletin of the Karaganda University. Mathematics Series. 2022, 105(1), P. 4–12. https://rep.ksu.kz//handle/data/13150