Поэтому мы, говоря об ИИ, будем отталкиваться именно от такой интерпретации термина «artificial intelligence»: наличие в системе алгоритмов с реализацией таких качеств, как «обработка, распознавание и интерпретация», «анализ и предсказание», «понимание и проницательность», базирующихся на законах, методах и подходах современной науки и, прежде всего, математики, физики и информатики. При этом указанные качества имеют весьма широкий диапазон приложений.

Повышенное внимание к ИИ в средствах массовой информации, помимо специализированных изданий, когда демонстрируются уникальные возможности антропоморфных и бионических роботов, специализированных игровых систем и комплексов, создает у людей впечатление, что технологии ИИ имеют значительное развитие в широком диапазоне приложений. В реальности дела обстоят совершенно не так, и по многим направлениям внедрение ИИ находится еще только на начальной стадии.

Так, во многих сферах промышленности, где потенциал и эффективность использования технологий ИИ просто безграничны, примеров разработки систем с элементами ИИ еще совершенно мало.

Для использования и развития искусственного интеллекта необходимо наличие как минимум трех составляющих: значительные вычислительные мощности, большие объемы данных и знаний, развитые интеллектуальные алгоритмы. В XXI веке существенно выросли вычислительные мощности, математиками и программистами разработаны новые эффективные методы и алгоритмы в области ИИ (в частности, методы «глубокого обучения»). Это в совокупности и обусловило значимый прогресс в области создания современных технологий ИИ и, что важно, стимулировало правительства многих государств серьезно заняться вопросами поддержки развития ИИ в своих странах.

На наш взгляд, необходимое требование к «системам с интеллектом» в настоящее время состоит в том, что элементы ИИ не должны «работать» как «черные ящики», выдающие решение. Они должны не только представлять собой вызывающий доверие инструментарий для решения задачи, но и демонстрировать понятный и эффективный путь получения решения. В особенности это проявляется при разработке автоматизированных систем поддержки принятия решений как одного из наиболее перспективных направлений развития ИИ, в особенности при разработке интеллектуальных систем моделирования и прикладных расчетов. Отметим, что на современном этапе речь идет об автоматизированных системах, т. е. системах с участием человека в управлении процессом, осуществляемым при поддержке ИИ.

Одними из стратегических целей активного развития систем ИИ является разработка математических основ методов обработки и интеллектуального анализа данных для различных прикладных областей и направлений; разработка математических основ систем компьютерного моделирования, расчетов и анализа разнообразных физических процессов; переход к новым интеллектуальным CAD-, CAE- и CAM-технологиям.

В докладе обсуждаются различные аспекты эффективности внедрения технологий ИИ в механике. Рассматриваются наиболее перспективные направления использования ИИ в различных разделах современной механики.

УДК 539.3, 539.8

ПОСТАНОВКА ОДНОМЕРНОЙ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЗАДАЧИ ТЕРМОМЕХАНОДИФФУЗИИ ДЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ С УЧЕТОМ РЕЛАКСАЦИИ ДИФФУЗИОННЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Н. А. ЗВЕРЕВ
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

А. В. ЗЕМСКОВ
Московский авиационный институт (НИУ),
НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, Российская Федерация

В настоящей работе приводится математическая постановка одномерной полярно-симметричной задачи термомеханодиффузии для однородного многокомпонентного ортотропного сплошного цилиндра, находящегося под действием нестационарных возмущений. Учтена релаксация температурных и диффузионных процессов. За основу берётся общая модель термомеханодиффузии для анизотропной сплошной среды, приведённая в работе [1]:

$$\rho\frac{\partial^2 u^i}{\partial t^2}=\nabla_j\left(C^{ijkl}\nabla_k u_l\right)-\nabla_j\left(b^{ij}\vartheta\right)-\sum_{r=1}^{N}\nabla_j\left(\alpha^{(r)ij}\eta^{(r)}\right)+\rho F^i,$$

$$\rho c_0\left(\frac{\partial\vartheta}{\partial t}+\tau_\vartheta\frac{\partial^2\vartheta}{\partial t^2}\right)=\nabla_j\left(\kappa^{ij}\nabla_j\vartheta\right)-T_0 b^{ij}\nabla_j\left(\frac{\partial u_j}{\partial t}+\tau_\vartheta\frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2}\right)-$$

$$-\rho RT_0\sum_{r=1}^{N}\frac{\ln\left(n_0^{(r)}\gamma^{(r)}\right)}{m^{(q)}}\left(\frac{\partial\eta^{(r)}}{\partial t}+\tau_\vartheta\frac{\partial^2\eta^{(r)}}{\partial t^2}\right)+\rho\left(q^{(J)}+\tau_\vartheta\frac{\partial q^{(J)}}{\partial t}\right),\qquad(1)$$

$$\frac{\partial\eta^{(q)}}{\partial t}+\tau_\eta^{(q)}\frac{\partial^2\eta^{(q)}}{\partial t^2}-F^{(q)}=\sum_{r=1}^{N}\nabla_i\left(D^{(q)ij}g^{(qr)}\nabla_j\eta^{(r)}\right)-$$

$$-\frac{m^{(q)}n_0^{(q)}}{\rho RT_0}\nabla_i\left[D^{(q)ij}\nabla_j\left(\alpha^{(q)kl}\nabla_k u_l\right)\right]-\frac{n_0^{(q)}}{T_0}\ln\left(n_0^{(q)}\gamma^{(q)}\right)\nabla_i\left(D^{(q)ij}\nabla_j\vartheta\right),$$

где t – время; u^i – компоненты вектора механических перемещений; κ^{ij} – компоненты тензора теплопроводности; ∇_j – оператор ковариантного дифференцирования; ϑ – изменение (приращение) температуры; ρ – плотность тела (сплошной среды); $\eta^{(q)}$ – приращение концентрации многокомпонентного вещества, $\eta^{(q)}=n^{(q)}-n_0^{(q)}$, $n_0^{(q)}$ и $n^{(q)}$ – начальная и текущая концентрации q-го вещества в составе N+1-компонентной сплошной среды; $m^{(q)}$ – молярная масса q-го вещества в составе N+1-компонентной сплошной среды; $D^{(qr)ij}$ – коэффициенты диффузии, $D^{(qr)ij}=g^{(qr)}D^{(q)ij}, D^{(q)ij}$; $g^{(qr)}$ – термодинамические множители Даркена; $F^{(q)}$ – объемная плотность источников массопереноса; $\mathbf{F}=F^i\mathbf{e}_i$ – удельная плотность объемных сил; $q^{(j)}$ – объемная плотность источников теплопереноса; T_0 – температура сплошной среды; $\alpha^{(q)ij}$ – компоненты упругодиффузионного тензора, характеризующего деформации, которые возникают вследствие диффузии; R – универсальная газовая постоянная; $\tau_\eta^{(q)}$ – время релаксации диффузионных потоков; τ_ϑ – время релаксации тепловых потоков; C^{ijkl} – компоненты тензора упругих постоянных; b^{ij} – компоненты тензора температурных постоянных; $\gamma^{(q)}$ – коэффициент активности; c_0 – удельная теплоёмкость.

В случае одномерных процессов, $\mathbf{u}=\left\{u_r(r,t),0,0\right\}$, $\vartheta=\vartheta(r,t)$, $\eta^{(q)}=\eta^{(q)}(r,t)$. Тогда система (1) запишется так:

$$\rho\frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2}=c_{11}\left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial u_r}{\partial r}\right)-\frac{c_{22}}{r^2}u_r-b_1\frac{\vartheta}{r}-\sum_{i=1}^{N}\alpha_1^{(i)}\frac{\partial\eta^{(i)}}{\partial r}+\rho F_r,$$

$$\rho c_0\left(\frac{\partial\vartheta}{\partial t}+\tau_\vartheta\frac{\partial^2\vartheta}{\partial t^2}\right)=\kappa_1\left(\frac{\partial^2\vartheta}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial\vartheta}{\partial r}\right)-T_0 b_1\left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial r\partial t}+\tau_\vartheta\frac{\partial^3 u_r}{\partial r\partial t^2}\right)-$$

$$-\rho RT_0\sum_{i=1}^{N}\frac{\ln\left(n_0^{(i)}\gamma^{(i)}\right)}{m^{(q)}}\left(\frac{\partial\eta^{(i)}}{\partial t}+\tau_\vartheta\frac{\partial^2\eta^{(i)}}{\partial t^2}\right)+\rho\left(q^{(J)}+\tau_\vartheta\frac{\partial q^{(J)}}{\partial t}\right),$$

$$\frac{\partial\eta^{(q)}}{\partial t}+\tau_\eta^{(q)}\frac{\partial^2\eta^{(q)}}{\partial t^2}-F^{(q)}=-\Lambda_{11}^{(q)}\left(\frac{\partial^3 u_r}{\partial r^3}+\frac{2}{r}\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2}-\frac{1}{r^2}\frac{\partial u_r}{\partial r}+\frac{u_r}{r^3}\right)+$$

$$+\sum_{r=1}^{N}D_1^{(qr)}\left(\frac{\partial^2\eta^{(r)}}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial\eta^{(r)}}{\partial r}\right)-M_1^{(q)}\left(\frac{\partial^2\vartheta}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial\vartheta}{\partial r}\right),\qquad(2)$$

где c_{ij}, b_i, κ_i, $D_i^{(q)}$ и $\alpha_i^{(q)}$ – физические компоненты тензоров $\mathbf{C}=C^{ijkl}\mathbf{e}_i\mathbf{e}_j\mathbf{e}_k\mathbf{e}_l$, $\mathbf{b}=b^{ij}\mathbf{e}_i\mathbf{e}_j$, $\boldsymbol{\kappa}=\kappa^{ij}\mathbf{e}_i\mathbf{e}_j$, $\boldsymbol{\alpha}^{(q)}=\alpha^{(q)ij}\mathbf{e}_i\mathbf{e}_j$ и $\mathbf{D}^{(q)}=D^{(q)ij}\mathbf{e}_i\mathbf{e}_j$, записанные в нотации Фойгта, а остальные коэффициенты определяются так:

$$\Lambda_{11}^{(q)} = \frac{m^{(q)} n_0^{(q)} D_1^{(q)} \alpha_1^{(q)}}{\rho R T_0}, \quad M_1^{(q)} = \frac{n_0^{(q)}}{T_0} \ln\left(n_0^{(q)} \gamma^{(q)}\right) D_1^{(q)}.$$

Для получения замкнутой постановки задачи на поверхности $\Pi = \partial G$ рассматриваемых тел задаются краевые условия следующего вида:

– кинематические условия:

$$u_r\big|_{\Pi_u} = f_r(t), \quad \vartheta\big|_{\Pi_\vartheta} = Q(t), \quad \eta^{(q)}\big|_{\Pi_\eta} = f^{(q)}(t); \tag{3}$$

– динамические условия:

$$\sigma_r\big|_{\Pi_\sigma} = f_r(t), \quad \left(q_r + \tau_\vartheta \frac{\partial q_r}{\partial t}\right)\bigg|_{\Pi_q} = Q(t), \quad \left(J_r^{(q)} + \tau_\eta^{(q)} \frac{\partial J_r^{(q)}}{\partial t}\right)\bigg|_{\Pi_J} = f^{(q)}(t). \tag{4}$$

Полагая, что начальное состояние является невозмущенным, система (2) дополняется нулевыми начальными условиями:

$$\begin{gathered} u(r,t)\big|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial u(r,t)}{\partial t}\bigg|_{t=0} = 0, \quad \vartheta(r,t)\big|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial \vartheta(r,t)}{\partial t}\bigg|_{t=0} = 0, \\ \eta_q(r,t)\big|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial \eta_q(r,t)}{\partial t}\bigg|_{t=0} = 0. \end{gathered} \tag{5}$$

В цилиндрической системе координат физические компоненты тензора механических напряжений, векторов теплового и диффузионного потоков имеют вид

$$\begin{gathered} \sigma_r = c_{11} \frac{\partial u_r}{\partial r} + c_{12} \frac{u_r}{r} - b_1 \vartheta - \sum_{j=1}^{N} \alpha_1^{(j)} \eta^{(j)}, \quad q_r + \tau_\vartheta \frac{\partial q_r}{\partial t} = -\kappa_1 \frac{\partial \vartheta}{\partial r}, \\ J_r^{(q)} + \tau_\eta^{(q)} \frac{\partial J_r^{(q)}}{\partial t} = \Lambda_{11}^{(q)} \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} \right) - M_1^{(q)} \frac{\partial \vartheta}{\partial r} - \sum_{r=1}^{N} D_1^{(qr)} \frac{\partial \eta^{(r)}}{\partial r}. \end{gathered} \tag{6}$$

Таким образом, предложена модель, описывающая одномерные термомеханодиффузионные процессы в цилиндрических телах с учетом релаксации тепловых и диффузионных потоков. Постановка (2)–(5) является обобщением модели упругой диффузии, рассматриваемой ранее в работе [2], которая учитывает влияние температуры на механическое и диффузионные поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (№ 23-21-00189).

Список литературы

1 **Земсков, А. В.** Моделирование механодиффузионных процессов в многокомпонентных телах с плоскими границами / А. В. Земсков, Д. В. Тарлаковский. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2021. – 288 с. – ISBN 978-5-9221-1912-2.

2 **Зверев, Н. А.** Моделирование нестационарных механодиффузионных процессов в полом цилиндре с учетом релаксации диффузионных потоков / Н. А. Зверев, А. В. Земсков // Математическое моделирование. – 2023. – Т. 35, № 1. – С. 95–112.

УДК 539.3, 539.8

МОДЕЛЬ ИЗГИБА ОРТОТРОПНОЙ КОНСОЛЬНО-ЗАКРЕПЛЁННОЙ БАЛКИ БЕРНУЛЛИ – ЭЙЛЕРА ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕРМОМЕХАНОДИФФУЗИОННЫХ НАГРУЗОК

А. В. ЗЕМСКОВ
Московский авиационный институт (НИУ),
НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, Российская Федерация

ЛЕ ВАН ХАО, Д. О. СЕРДЮК
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

В работе рассматривается нестационарная задача о плоском термоупругодиффузионном изгибе консольно-закрепленной однородной изотропной балки Бернулли – Эйлера. Математическая постановка представляет собой замкнутую систему уравнений поперечных колебаний балки с учетом