

10 Zhuravkov, M. A. Mechanics of Solid Deformable Body / M. A. Zhuravkov, Lyu Yongtao, E. I. Starovoitov. – Singapore : Springer, 2022. – 317 p.

11 Абдусаттаров, А. Деформирование и повреждаемость упругопластических элементов конструкций при циклических нагрузениях / А. Абдусаттаров, Э. И. Старовойтов, Н. Б. Рузиева. – Ташкент : IDEAL PRESS, 2023. – 381 с.

12 Старовойтов, Э. И. Исследование спектра частот трехслойной цилиндрической оболочки с упругим наполнителем / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 162–169.

13 Деформирование ступенчатой композитной балки в температурном поле / Э. И. Старовойтов [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88, № 4. – С. 987–993. – EDN UARYZD.

УДК 536.24

МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ТЕПЛОАПРЯЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

О. В. ТУШАВИНА

Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Проблема тепловой защиты конструкции высокоскоростных летательных аппаратов (ВЛА) от аэродинамического нагрева стала одной из важнейших научных проблем в связи с созданием изделий авиационной и ракетно-космической техники, совершающей полет в атмосфере со скоростями, значительно превышающими скорость звука ($M \geq 6$).

Аэродинамический нагрев обусловлен газовой динамикой обтекания тела сверхзвуковым потоком.

Физическая природа аэродинамического нагрева обусловлена тем, что в связи с громадной скоростью полета аппарата молекулы атмосферы обладают относительно аппарата большой кинетической энергией. Достигнув у поверхности аппарата ударной волны, а затем сжатого и вязкого пограничного слоя, молекулы начинают интенсивно тормозиться. При торможении высокоскоростных частиц их кинетическая энергия переходит в тепловую. Этот процесс определяет интенсивность аэродинамического нагрева конструкции аппарата.

Повышаются термодинамические параметры (температура и давление) газа набегающего потока до экстремальных значений. В результате в указанных зонах реализуются химические реакции диссоциации молекул и даже ионизации атомов, т. е. возникает комплекс физико-химических процессов, обусловленных термогазодинамикой и тепломассообменом. В этой связи возникает проблема разработки специальной тепловой защиты конструкции ВЛА, что в свою очередь требует разработки эффективных экспериментально-теоретических и прикладных решений в различных областях науки и техники, например, в разработке материалов теплозащитного назначения для снижения воздействия аэродинамического нагрева на аппараты.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSFF-2023-0007).

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕРМОУПРУГИХ ТЕЛАХ МЕТОДАМИ ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

ФАН ТУНГ ШОН

Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Г. В. ФЕДОТЕНКОВ

Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

Физически информированное машинное обучение – это новый, многообещающий подход к решению различных задач математической физики, зачастую таких, которые не поддаются решению другими методами или требуют значительных затрат как человеческого, так и машинного времени. Машин-

ное обучение сегодня – это уже достаточно развитая и быстро развивающаяся отрасль прикладной математики. Методы и алгоритмы машинного обучения позволяют успешно решать многочисленные насущные проблемы в самых различных отраслях промышленности, технологий производства, экономики и финансов, электронной коммерции, медицине, строительстве, транспорте и др. Следует отметить, что до буквально нескольких последних лет глубокое машинное обучение применялось почти исключительно в прикладных задачах, основанных на сопоставлении входных и выходных данных. Методы глубокого машинного обучения обходили вниманием задачи моделирования физико-механических, химических, биологических и прочих процессов, математические модели которых представляют собой системы уравнений математической физики, дополненные граничными, начальными условиями и другими математическими соотношениями. Эти задачи имеют чрезвычайную важность, поскольку выступают в качестве фундамента, на который опираются различные прикладные отрасли.

Целью данной работы является раскрытие возможностей применения методов глубокого машинного обучения к решению нестационарных связанных задач механики термоупругих тел. В работе рассмотрены процессы нестационарных термоупругих колебаний в слое постоянной толщины [1]. Приведены замкнутые математические постановки соответствующих задач.

В основе методов глубокого машинного обучения применительно к решению задач математической физики лежит аппроксимация искомым функций с помощью нейронных сетей с физическим подкреплением (физически информированных нейронных сетей). Соответственно, искомым функциям, которыми являются перемещения и изменение температуры в слое, ставятся в соответствие нейросетевые аппроксимации на основе глубоких полносвязных нейронных сетей [2]. Путем изменения значений весов и сдвигов в нейронах можно изменять значения аппроксимации на выходе из нейронной сети. Именно поиск таких значений весов и сдвигов, при которых нейронная сеть будет аппроксимировать исходную функцию с заданной точностью в заданной области определения решения, и является целью глубокого машинного обучения. Отметим, что в случае дифференцируемых функций активации вся нейронная сеть представляет собой дифференцируемую функцию как по входным переменным, так и по внутренним параметрам (весам и сдвигам). Если же функция активации является аналитической, то нейронную сеть можно рассматривать как аналитическую функцию. Двумерной пространственно-временной области, на которой разыскивается решение, ставится в соответствие множество дискретно расположенных точек коллокации. Точки коллокации распределяются случайно, подчиняясь равномерному закону распределения. При решении физико-математических задач методами глубокого машинного обучения, исходной задаче ставится в соответствие эквивалентная задача математической оптимизации, а именно задача о поиске минимума целевой функции (функции потерь). Целевая функция представляет собой сумму норм невязок всех уравнений и соотношений, составляющих математическую постановку задачи. Она является однозначной функцией многих переменных. Этими переменными являются веса и сдвиги нейронной сети. Они называются обучаемыми переменными. Отметим, что количество обучаемых переменных зависит не только от числа нейронов в сети, но и от числа связей между нейронами. Поэтому число обучаемых переменных в глубоких нейронных сетях обычно значительно превышает число нейронов. Невязки вычисляются на множестве точек коллокации. Целью метода обучения нейронной сети является нахождение глобального минимума функции потерь на многомерном пространстве весов и сдвигов. Поскольку функция является дифференцируемой, для определения ее глобального минимума можно воспользоваться каким-либо вариантом метода градиентного спуска. В данной работе используются известный и хорошо зарекомендовавший себя метод адаптивной оценки моментов и построенный на его основе алгоритм «Adam» [3].

В результате получены решения различных задач о нестационарных термоупругих колебаниях изотропного слоя постоянной толщины. Проведено сравнение полученных результатов с численными решениями, построенными с помощью метода конечных разностей. Показано, что физически информированные нейронные сети способны с достаточной степенью точности аппроксимировать решения нестационарных задач теории термоупругости.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00389.

Список литературы

- 1 Земсков, А. В. Одномерные нестационарные задачи термоупругости : учеб. пособие / А. В. Земсков, Д. В. Тарлаковский, Г. В. Федотенков. – М. : Изд-во МАИ, 2023. – 96 с.
- 2 Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2006. – 1104 с.
- 3 Kingma, D. P. A Method for Stochastic Optimization [Electronic resource] / D. P. Kingma, J. L. Ba. – Mode of access : <https://arxiv.org/abs/1412.6980>. – Date of access : 20.08.2024. – DOI : 10.48550/arXiv.1412.6980.