

НЕЙРОСЕТЕВАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ТАБЛИЧНО ЗАДАННОГО УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ

А. В. Еришова¹, Е. И. Несмиянов^{1, 2}

¹ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

²Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет),
Челябинск, Россия

Уравнение состояния связывает различные термодинамические величины (плотность, температура и давление) и применяется при математическом моделировании различных физических процессов. Для моделирования некоторых физических явлений, таких как непрямое обжатие мишеней для инерциального термоядерного синтеза [1, 2], моделирование направленного рентгеновского излучения [3], используются многофазные широкодиапазонные уравнения состояний веществ. Разработка таких уравнений состояний является современной сложной задачей науки и техники [4–7]. Зачастую широкодиапазонное многофазное уравнение состояния представляет собой кусочно-заданную функцию, частично или полностью заданную в табличном виде [8]. Интерполяция по таким таблицам вносит дополнительную погрешность, а численное взятие частных производных от давления, особенно в точках фазовых переходов, составляет отдельную трудоемкую задачу. Получение аппроксимации сложных уравнений состояния в виде непрерывной дифференцируемой функции может быть решением данной проблемы. В работе [9] рассматривается нейросетевой подход аппроксимации уравнения состояния.

В данной работе предложен метод аппроксимации таблично заданного уравнения состояния вещества в виде зависимости давления от плотности и температуры в широких диапазонах с помощью нейронной сети. Аппроксимация табличных значений производилась для различных видов уравнений состояний с заданными аналитическими формулами. На основе аналитических формул формируются табличные данные, которые подаются нейронной сети: плотность и температура на входной слой, давление на выходной. В процессе машинного обучения сеть подбирает значения весов и смещений, чтобы минимизировать разницу между прогнозируемым и фактическим значениями. В итоге получена аппроксимирующая явно заданная функция, по которой можно вычислить значения давления в любой промежуточной точке из заданных диапазонов плотностей и температур.

В работе были аппроксимированы поверхности давления для уравнения состояния идеального газа, двучленного уравнения состояния Ми-Грюнайзена и модельного многофазного широкодиапазонного уравнения состояния. Для уравнения состояния идеального газа проведено тестирование на пяти газодинамических задачах [10], для уравнения состояния Ми-Грюнайзена на двух задачах [11, 12]. Особенностью многофазного широкодиапазонного уравнения состояния является то, что, несмотря на гладкий вид поверхности давления в линейном масштабе, имеются заметные фазовые переходы в логарифмическом. В работе предложен метод аппроксимации двумерной поверхности в логарифмическом масштабе как независимых переменных, так и искомой величины. Переход к аппроксимации в логарифмической шкале позволил точнее описать сложную структуру многофазного широкодиапазонного уравнения состояния.

Оценка погрешности предложенного нейросетевого подхода аппроксимации табличных данных проводится в сравнении с заданными аналитическими формулами уравнений состояний. Тестирование показало эффективность предложенного подхода нейросетевой аппроксимации давления.

Литература

1. **Вронский, А. В.** Моделирование переноса и поглощения лазерного излучения в мишенях инерциального термоядерного синтеза с непрямым воздействием [Текст] / А. В. Вронский, И. С. Чубарешко, А. А. Шестаков // ВАНТ. Сер. «Математическое моделирование физических процессов». – 2022. – Вып. 1. – С. 3–16.
2. **Abu-Shawareb, H.** Achievement of target gain larger than unity in an inertial fusion experiment [Text] / H. Abu-Shawareb et al. // Physical Review Letters. – 2024. – Vo. 132. – P. 065102.

3. **Абраменко, Д. Б.** Плазменные источники экстремального ультрафиолетового излучения для литографии и сопутствующих технологических процессов [Текст] / Д. Б. Абраменко, П. С. Анциферов, Д. И. Астахов и др. // Успехи физических наук. – 2019. – Т. 189, № 3. – С. 323–334.
 4. **Сох, G. A.** A Multi-Phase Equation of State and Strength Model for Tin [Text] // AIP Conf. Proc. – 2006. – Vol. 845. – P. 208–211.
 5. **Антонов, В. И.** Широкодиапазонные уравнения состояния алюминия и меди для моделирования воздействия лазерного излучения на вещество [Текст] / В. И. Антонов, Р. В. Давыдов, Н. В. Калинин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2014. – Т. 1, № 190. – С. 198–203.
 6. **Elkin, V. M.** A wide-range multiphase equation of state for platinum [Text] / V. M. Elkin, V. N. Mikhaylov, A. A. Ovechkin, N. A. Smirnov // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2020. – Vol. 32. – P. 435403.
 7. **Елькин, В. М.** Многофазное широкодиапазонное уравнение состояния меди [Текст] / В. М. Елькин, В. Н. Михайлов, А. А. Овечкин // Физика горения и взрыва. – 2024. – Т. 60, № 6. – С. 74–85.
 8. **Ovechkin, A. A.** Plasma ionization balance in chemical-picture and average-atom models [Text] / A. A. Ovechkin, P. A. Loboda, V. V. Popova et al. // PHYSICAL REVIEW E. – 2023. – Vol. 108. – P. 015207.
 9. **Kevrekidis, G. A.** Neural network representations of multiphase Equations of State [Text] / G. A. Kevrekidis, D. A. Serino, M. A. R. Kaltenborn et al. // Nature. – 2024. – Vol. 14. – P. 30288.
 10. **Toro, E. F.** Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics: a practical introduction [Text] : third edition. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
 11. **Глазырин, И. В.** Решатель Римана HLLEM для трехмерной многокомпонентной газовой динамики с произвольным уравнением состояния [Текст] / И. В. Глазырин, А. В. Ершова, Н. А. Михайлов // ВАНТ. Сер. «Математическое моделирование физических процессов». – 2023. – № 4. – С. 44–58.
 12. **Ковалев, А. Е.** Исследование поправочного коэффициента кристалла фторида лития в процессе его ударного сжатия и изэнтропической разгрузки [Текст] / А. Е. Ковалев, А. В. Красильников, Е. И. Несмиянов и др. // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Математика, механика, физика». – 2024. – Т. 16, № 4. – С. 96–106.
-