

**0.1. Кузнецов К.С. Решение задач дизайна тепловых оболочек при помощи машинного обучения**

В работе [1] представлено применение машинного обучения для решения обратной задачи дизайна тепловых оболочек. Авторами была численно решена прямая задача теплового рассеяния, сформирована база данных, обучены нейронные сети на предсказание двух выбранных функционалов. Также авторы утверждают, что не существует хорошо прогнозируемой внутренней связи между свойствами материалов слоёв оболочки и одним из выбранных функционалов. Целью текущей работы является проверить данное утверждение, а также дополнительно исследовать возможность решения задачи дизайна тепловых оболочек при помощи машинного обучения.

Обратная задача полной тепловой маскировки имеет следующий вид:

$$\Delta T(k_1, k_2, k_3, k_4) + M_\nu(k_1, k_2, k_3, k_4) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $k_1, k_2, k_3, k_4$  – коэффициенты теплопроводности слоёв оболочки.

Функционал  $M_\nu$  – предложен в работе [2], характеризует эффективность внутренней тепловой маскировки и имеет следующий вид:

$$M_\nu = \frac{\int_{\Omega_5} |T_5(x, y) - T_r(x, y)| dx dy}{\int_{\Omega_5} dx dy},$$

где  $T_r(x, y) \in \Omega_5$  – тепловое поле до внесения оболочки.

Функционал  $\Delta T$  [1] характеризует эффективность внешней тепловой маскировки:

$$\Delta T = |T_0|_{x=\frac{l}{2}-R_0, y=\frac{l}{2}} - T_0|_{x=\frac{l}{2}+R_0, y=\frac{l}{2}}|.$$

Решение обратной задачи полной маскировки (1) заключается в нахождении оптимальных значений  $k_1, k_2, k_3, k_4$  по известным значениям  $\Delta T$  и  $M_\nu$ . Значения функционалов находятся при помощи обученных нейронных сетей. Для обучения использовалось множество решений прямой задачи теплового рассеяния [3]:

$$\Delta T_i = 0, (r, \varphi) \in \Omega_i, i = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \quad (2)$$

$$k_i \frac{\partial T_i}{\partial r} = k_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial r}, T_i(r, \varphi) = T_{i+1}(r, \varphi), \quad (3)$$

$$0 \leq \varphi \leq 2\pi, r = R_i, i = 0, 1, 2, 3, 4,$$

$$T_5|_{x=0} = T_l, \quad T_5|_{x=L} = T_r, \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_5}{\partial y}|_{y=0} = 0, \quad \frac{\partial T_5}{\partial y}|_{y=L} = 0,$$

где  $T_l, T_r$  – заданные функции,  $\Omega_i, k_i, T_i$  – область, теплопроводность и температурное поле подобласти

$i$  соответственно, где  $i = 0$  соответствует телу внутри оболочки,  $i = 1, 2, 3, 4$  соответствуют слоям оболочки,  $i = 5$  соответствует области вокруг оболочки.

Прямая задача (2)–(4) решается численно методом конечных элементов при помощи программного обеспечения FreeFem++. Для решения обратной задачи с было сформировано несколько баз данных решений прямой задачи для разных распределений набора параметров  $k_1, k_2, k_3, k_4$ , включая распределение параметров из работы [1]. Было успешно обучено несколько нейронных сетей разной архитектуры для предсказания  $\Delta T, M_\nu$  и их суммы. Для оптимизации функции предсказания нейронной сети был использован метод имитации отжига. Были получены оптимальные наборы параметров  $k_1, k_2, k_3, k_4$ , произведено сравнение с результатами других авторов.

**Список литературы**

- [1] Ji Q., Qi Y., Liu Ch., Meng S., Liang J., Kadic M., Fang G. Design of thermal cloaks with isotropic materials based on machine learning // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. Vol. 189.
- [2] Ji Q., Chen Ч., Fang П., Liang J., Yan X., Laude V., Kadic M. Thermal cloaking of complex objects with the neutral inclusion and the coordinate transformation methods // AIP Advances. 2019. Vol. 9.
- [3] Алексеев Г.В., Левин В.А., Терешко Д.А. Анализ и оптимизация в задачах дизайна устройств невидимости материальных тел / Москва: Физматлит, 2021. 328 с.