

### 0.1. Ли Х. Основанное на данных развитие моделей турбулентности с помощью ме- тодов машинного обучения

Модели подхода RANS для замыкания осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса имеют ряд ограничений из-за невысокой точности и неуниверсальности. Однако, они до сих пор широко применяются в инженерных расчетах, не требуя больших вычислительных мощностей, что является значительным преимуществом этого подхода. Поэтому актуальна задача по улучшению точности RANS-моделей. В этом могут помочь алгоритмы машинного обучения (ML), использующие доступные наборы данных высокой точности, которые получены путем измерений или численного моделирования вихре-разрешающими методами DNS (Direct Numerical Simulation) и LES (Large Eddy Simulation) для канонических течений жидкости и газа.

В данной работе рассматривается применение различных методов машинного обучения: нейронная сеть с тензорным базисом (TBNN) [1] для аппроксимации напряжений Рейнольдса; программирование экспрессии генов (GEP) [2]. Последний метод предназначен для получения явных алгебраических выражений для напряжений Рейнольдса. Для обучения и калибровки моделей используется высокоточные данные DNS для канонических турбулентных течений в двумерных каналах с выступами, документированные в ряде работ.

Модели анизотропии напряжений Рейнольдса, полученные при помощи TBNN с обучением на DNS-данных [3], имплементированы в модифицированный решатель OpenFOAM. Проведены априорные оценки и предварительные тестовые расчеты по новому решателю для турбулентных течений в каналах с сужением-расширением и с периодическими холмами. Результаты показывают, что использование ML-методов приводит к уточнению распределений для компонент тензора анизотропии напряжений Рейнольдса по сравнению с их аналогами, вычисленными по базовой линейной модели вихревой вязкости (градиентной гипотезы Буссинеска).

*Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 22-19-00587).*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Яковенко С. Н.*

#### Список литературы

- [1] LING J., KURZAWSKI A., TEMPLETON J. Reynolds averaged turbulence modelling using deep neural networks with embedded invariance // J. Fluid Mech. 2016. Vol. 807. P. 155–166.
- [2] WEATHERITT J., SANDBERG R. A novel evolutionary algorithm applied to algebraic modifications of the RANS stress-strain relationship // J. Comput. Phys. 2016. Vol. 325. P. 22–37.
- [3] XIAO H., WU J.-L., LAIZET S., DUAN L. Flows over periodic hills of parameterized geometries: A dataset for data-driven turbulence modeling from direct simulations // Comput. Fluids. 2020. Vol. 200. 104431.